

RASSEGNA TECNICA

La "Rassegna tecnica", vuole essere una libera tribuna di idee e, se del caso, saranno graditi chiarimenti in contraddittorio; pertanto le opinioni ed i giudizi espressi negli articoli e nelle rubriche fisse non impegnano in alcun modo la Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino

La fatica delle funi nel quadro generale della resistenza a fatica

ITALO BERTOLINI, nella sua prolusione ai lavori del Colloquio Internazionale sulla Fatica delle Funi Metalliche, tenutosi al Politecnico di Torino lo scorso settembre nel quadro di Italia 61, ha tracciato il profilo storico della nascita di quello strumento per il trasporto ed il comando che è la fune d'acciaio, oggi diffusissimo, un secolo fa quasi ignoto, ed illustra con ampia documentazione gli studi teorici e sperimentali sui principali fenomeni connessi con la durata del flessibile, che si inquadrano nel caso generale della fatica e dell'usura dei metalli.

Un Colloquio internazionale sulla fatica delle funi metalliche può a mio avviso ben a ragione trovare la sua sede in Torino: ed invero in Torino, presso il Laboratorio Sperimentale dei Materiali da Costruzione del Politecnico, si sono svolte ad opera del Guidi, per quanto io sappia, le prime (almeno per riferirmi agli studi pubblicati) sistematiche e fondamentali ricerche sperimentali italiane su funi metalliche tolte dal servizio, ossia su funi che avevano subito l'effetto della fatica prodotta dal lavoro che avevano svolto.

A queste ricerche (sempre per quanto riguarda ricerche pubblicate) svoltesi negli anni dal 1908 al 1909, ne hanno fatto seguito altre nel 1918, sempre su funi tolte dal servizio.

Il Guidi, del quale, nella mia qualità di rappresentante a questo Colloquio, insieme al Chiarissimo Professore Manlio Oberziner, per conto del Ministero dei Trasporti, della Commissione Statale Italiana per le Funicolari aeree e terrestri, sono particolarmente onorato di ricordare l'intensa luminosa opera di primo Presidente della stessa Commissione, iniziò, nel 1928, anche ricerche a fatica con un piccolo ingegnoso impianto, su una fune portante per funivia, ricerche che però purtroppo dovettero essere interrotte per le solite, di quei tempi, ma si spera non di ora, difficoltà finanziarie, pur avendo

già portato a qualche risultato di interesse.

Parallelamente a queste indagini sperimentali, Torino è stata la sede della prima ricerca teorica italiana, ad opera del Panetti, sulle deformazioni delle funi metalliche soggette a sollecitazioni assiali, ricerca cui fecero seguito quelle di Sesini.

Torino, quindi, si è acquistata, già da oltre un cinquantennio, si può dire il diritto di essere degna sede di un Colloquio sulla fatica delle funi metalliche, diritto confermato e ben riaffermato dal decennio di ricerche di Levi e Rossetti sulla fatica a flessotrazione delle funi.

Resistenza a fatica e nascita della fune metallica

Accennato così ad un doveroso riconoscimento verso Torino, posso ora passare ad esporre come la questione della fatica nelle funi metalliche trovi ampia ragione di essere posta nell'argomento più generale della resistenza a fatica, sia per quanto riguarda comportamento effettivo in servizio di organi, strutture o costruzioni soggette a fatica, sia per quanto riguarda indagini sperimentali sulla resistenza a fatica.

Invero si può dire che la nascita della fune metallica, quale organo ad applicazione sistematica per trasmissione di movimento ed a produzione con carattere continuo ossia che si può già dire

industriale, ha avuto origine da una questione di resistenza a fatica, ossia da una necessità di poter superare difficoltà date dalla insufficiente resistenza a fatica di organi meccanici. Ed è appunto per cercare di chiarire queste difficoltà manifestatesi in servizio, che fu impostata la prima vera ricerca sperimentale a fatica, ed è anche in conseguenza dei risultati di questa ricerca che si è avuta la nascita, nel senso suddetto, della fune metallica, di ferro.

Dobbiamo risalire al principio del milleottocento e porci nella regione dell'Harz, nella Germania centrale.

In questa regione relativamente montuosa, già da alcuni secoli erano in esercizio miniere metalliche con relativi pozzi d'estrazione. Questi pozzi d'estrazione, come succede anche al giorno d'oggi nei bacini minerari, con l'andare del tempo venivano sempre più approfonditi, sia per seguire l'andamento dei filoni, sia per cercarne altri a livello inferiore, dopo che i primi trovati si erano esauriti.

Per portare alla superficie i minerali estratti, insieme naturalmente allo sterile, erano adoperati ascensori o per meglio dire semplici argani che sollevavano una benna per mezzo di un organo di trazione.

L'organo di trazione era, nei primi tempi di sfruttamento delle miniere, costituito da una fune di canapa: questa fune però era

costosa e doveva essere frequentemente sostituita, perchè si consumava rapidamente.

L'ambiente dei pozzi infatti era fortemente umido, ciò che portava al deterioramento della canapa, e per di più i pozzi non erano i pozzi verticali del giorno d'oggi, ma spesso presentavano tratti variamente inclinati rispetto alla verticale, con la conseguenza che la fune strisciava contro alcune pareti del pozzo, in corrispondenza della curva o gomito fra un tratto ed il successivo.

Perciò, verso la fine del millecinquecento (1), per ridurre le spese d'esercizio si cominciò a sostituire alla fune di canapa una catena ad anelli di ferro fucinato e saldato alla forgia. Però la catena pesava notevolmente, così che occorreva già un notevole sforzo per sollevare la catena stessa, inconveniente che si rendeva sempre più rilevante di mano in mano che, come si è detto, la profondità del pozzo aumentava.

D'altra parte la catena di ferro, sotto le azioni di strappo ripetute che essa subiva quando la benna, nel salire o scendere, incontrava ostacoli al movimento in corrispondenza dei suddetti gomiti del pozzo, e quindi, vinto l'ostacolo, si liberava improvvisamente, era soggetta a frequenti subitane rotture.

I diversi tentativi fatti per ridurre gli inconvenienti suddetti, e particolarmente quelli derivanti dal grande sforzo occorrente per vincere il peso della catena stessa, non avendo avuto esito felice, si manifestò, verso la fine del mille-settecento, una notevole tendenza al ritorno alla fune di canapa, migliorandone le condizioni d'esercizio con diversi provvedimenti, come il rivestimento di legno delle pareti del pozzo e la cattratura della fune stessa, per aumentarne la resistenza all'umidità.

Questa situazione trovò nel 1806 Guglielmo Augusto Giulio Albert quando cominciò il suo servizio, con funzioni amministrative, alla Direzione delle miniere dell'Harz, in Clausthal.

Pur essendo giurista, Albert, per l'estendersi dei compiti via via affidatigli, venne presto ad occuparsi anche delle questioni tec-

niche connesse con l'esercizio delle miniere: ciò fece con tanta intensità e passione da acquistare piena conoscenza di tutti gli argomenti tecnici che incontrava.

Le funi di canapa per i pozzi d'estrazione, pur non dando luogo alle rotture improvvise che si verificavano con le catene di ferro, erano però pur sempre assai più costose di acquisto ed anche di esercizio, malgrado che i provvedimenti sopra indicati ne avessero aumentato la durata.

Per di più le funi di canapa dovevano essere acquistate all'Estero, mentre le condizioni economiche della regione dell'Harz dopo le lunghe guerre napoleoniche erano ancora assai difficili.

Perciò Albert si sforzò, in ogni modo, di poter conservare l'impiego delle catene di ferro come organo di trazione per gli argani, cercando di attenuarne gli inconvenienti con diversi provvedimenti, quale l'adozione di una catena continua di trazione chiusa ad anello (provvedimento già indicato da Leibniz nel 1685, ma non applicato allora, per difficoltà pratiche), a cui erano collegate le due benne rispettivamente in ascesa ed in discesa.

Così ottenne di ridurre il momento motore massimo da esercitare con la puleggia di comando, ma non di eliminare il grave disturbo delle frequenti rotture.

Come accade spesso in casi simili, furono dapprima attribuite queste rotture a cattiva qualità del materiale (dovuta anche alla scarsità di buone materie prime, conseguenza anch'essa delle ripetute guerre).

Ma, malgrado che Albert avesse fatto preparare (siamo arrivati al 1828) per un pozzo (Elisabetta), a titolo di esperimento, catene con particolari accorgimenti per quanto riguardava il materiale componente, la forma degli elementi ed il processo di fucinatura, e per di più si fossero migliorate le condizioni del pozzo eliminandone le irregolarità di profilo ed applicando rulli d'appoggio per la catena, dopo un esercizio di sole dieci settimane, la catena di trazione si ruppe improvvisamente, in trenta pezzi (2).

Esaminando gli anelli rotti (« innumerevoli » dice Albert) si

notava che le rotture si erano prodotte soltanto ai punti di articolazione degli anelli, ossia dove un anello faceva contatto con i due adiacenti. La superficie di rottura si presentava a grana fine come quella dell'acciaio duro, mentre invece in origine il materiale presentava una struttura ed una rottura fibrosa. Bastava, del resto, anche un modesto colpo di martello, applicato in testa ad un anello della catena, per rompere lo stesso in due parti con produzione di una superficie di rottura a grana fine come quella dell'acciaio duro.

I tratti laterali dell'anello conservavano invece la malleabilità e la capacità di subire piegamenti a freddo senza rotture, proprie dell'ottimo ferro adoperato per forgiare gli anelli.

Aspetti, del resto, simili delle superfici di rottura e delle parti laterali non rotte erano stati riscontrati negli anelli rotti di tutte le altre catene, che avevano subito improvvise rotture in esercizio.

Come accadde poi molte altre volte nel caso di rotture in esercizio e come ancora succede, i funzionari di Albert emisero diverse ipotesi per spiegare questo apparente indurimento dell'acciaio: stiramento e indurimento durante le prove di accettazione per effetto dell'applicazione di un carico eccessivo; sforzi violenti dati dagli urti che si verificavano al sollevamento brusco della benna dagli appoggi all'inizio della salita, oppure all'appoggio della benna sui sostegni della medesima alla fine della salita; riscaldamenti prodotti dal calore generato nei movimenti di strisciamento di un anello sull'altro; persino anche azioni chimiche dell'acqua del pozzo.

Soltanto Albert pensò che avrebbe dovuto trattarsi di un fenomeno di sollecitazione ripetuta, di « fatica » come si dice al giorno d'oggi.

Il movimento di articolazione di un anello di catena sul successivo, che si verificava all'avvolgersi (ed allo svolgersi), su ciascuna delle puleggie di guida e di comando, della catena soggetta al carico di 1500 kg dato dal peso sollevato e dal peso della catena stessa, doveva avere, secondo Albert, nelle

zone di articolazione degli anelli stessi, dove ogni anello premeva sull'altro, un'azione simile a quella di un colpo di martello a freddo, così da dar luogo ad un indurimento locale del materiale, allo stesso modo che il martellamento a freddo poteva rendere il comune ferro, duro come acciaio da molle.

Il ripetersi di queste azioni, conseguenza del ripetersi dei piegamenti degli anelli della catena (Albert ne calcolò 93.000 per gli anelli della catena in questione) doveva esser la causa della rottura della catena stessa.

Poichè la sua ipotesi non era condivisa dai suoi collaboratori, Albert in principio del 1829 intraprese quella che anche dagli Autori più informati viene indicata come la « prima prova a fatica » che si riscontri nella Storia della Resistenza dei Materiali.

Egli prese una grande ruota a catena uguale a quelle adoperate nei pozzi: su questa dispose un tratto di catena delle stesse dimensioni di quelle usate per i pozzi, preparata col miglior materiale e nel miglior modo allora disponibile. Ad una estremità la catena era collegata ad una manovella il cui albero era mantenuto in rotazione continua con una ruota idraulica: all'altra estremità la catena portava il peso di 1500 kg, corrispondente al carico massimo in esercizio come sopra detto. Col movimento della manovella la catena subiva un movimento di oscillazione, avvolgendosi e svolgendosi sulla puleggia.

Dopo 100.000 oscillazioni la catena fu smontata dal predetto meccanismo di oscillazione.

Orbene, mentre all'esterno la catena non presentava alcuna usura, preso uno qualunque degli anelli che avevano subito i ripetuti movimenti di articolazione con gli anelli successivi, bastò un colpo di martello dato in testa all'anello stesso per mettere in luce, in corrispondenza della zona di articolazione, una struttura a grana molto fine come quella dell'acciaio duro: le parti laterali degli anelli si comportavano invece come prima della prova, ossia come acciaio tenero (dolce) a struttura fibrosa.

Albert fu il primo così a vedere

ed a dimostrare l'effetto della « fatica », ossia che un danneggiamento, che non si rende manifesto con una sola applicazione del carico, può invece finire a rendersi apertamente manifesto sotto un numero sufficientemente grande di applicazioni del carico.

Confermato così che la rottura della catena ad elementi di ferro era dovuta a sollecitazioni ripetute, ossia a « fatica » di eccessiva intensità nella zona di articolazione ossia di contatto fra le varie coppie di anelli, Albert provò diversi provvedimenti per migliorare le condizioni di quella zona di contatto, come inserzione di apposite guarnizioni distributrici della pressione fra anello ed anello, oppure aumento locale della resistenza degli anelli per mezzo di un aumento dello spessore alle estremità degli anelli. Ebbe dei notevoli miglioramenti, ma sempre però si verificarono rotture improvvise.

D'altra parte alcuni casi nei quali le rotture si verificarono dopo un tempo molto breve confermarono anche molti dubbi già sorti altre volte, che anche il miglior materiale adoperato (pur sempre ferro) poteva essere stato danneggiato durante l'operazione di saldatura alla forgia.

Ora già da tempo (da circa il 1770), per aumentare la resistenza (per unità di sezione) degli anelli, e quindi poterne ridurre il peso, erano stati adoperati anelli costituiti non da un'unica barra di ferro forgiato, ma da una serie di anelli di filo di ferro trafilato, tenuti uniti da una saldatura. Nel 1772 von Reden (3), allora direttore delle miniere dell'Harz, pensando giustamente che la saldatura poteva nuocere alla resistenza del ferro trafilato, ebbe l'idea di avvolgere semplicemente l'un sull'altro, a guisa dei fili costituenti un legnolo di una fune di canapa, i diversi giri di filo costituenti un anello della catena, così da ottenerne il collegamento per attrito.

Però, malgrado qualche prima prova favorevole, tale tentativo fu abbandonato, sembra (4) perchè si temeva che il relativamente sottile filo di ferro si consumasse rapidamente nello sfregare sulle pareti e sui gomiti dei pozzi.

Orbene Albert nel 1833 (5), vi-

ste le difficoltà di evitare le rotture con le catene ad anelli di ferro saldato, ebbe la stessa idea di von Reden, senza peraltro lui pure procedere oltre in quella direzione (Albert non conosceva i tentativi di von Reden).

Albert da tutto il decennio di prove e ricerche concluse che bisognava avere un organo di trazione di filo di ferro, il quale però non comportasse saldature, non fosse composto di singoli elementi che subissero danneggiamenti (indurimenti) per effetto delle pressioni locali fra elemento ed elemento, ma permettesse di utilizzare in pieno la resistenza a trazione longitudinale del materiale, senza far intervenire tratti lavoranti trasversalmente (a flessione).

L'organo perciò non doveva avere forma di catena ma doveva soltanto aver flessibilità, così da poter essere avvolto, entro i limiti di elasticità, sulle pulegge di circa 12 piedi dell'Harz (circa 3,70 metri) e poter poi ritornare diritto.

Dopo aver provato con un trefolo formato con tre fili di ferro di 3,5 mm di diametro avvolti l'uno sull'altro, e visto che esso era ancora flessibile, e provato anche con una fune formata con tre di questi trefoli avvolti l'uno sull'altro, visto che anche essa era flessibile, Albert il 3 febbraio 1834 si decise ad inserire, per prova, un tratto di questa fune di filo di ferro, fatta da lui preparare appositamente a mano, nella catena di sollevamento del pozzo Elisabetta.

La fune si mostra sufficientemente flessibile, si lascia avvolgere e svolgere sulla puleggia di 3,70 m di diametro senza alcun rumore udibile: difficoltà s'incontrano solo nell'attacco (redancia) della fune alla catena.

Migliorato questo attacco, Albert segue questa fune di prova nel suo lavoro di avvolgimento e svolgimento sulla puleggia e nota che dopo 5.000 piegamenti tutto è andato bene: la fune non si è rotta.

Dopo di allora le prove, in sostanza vere prove a fatica fatte in posto, si succedono con successo e si allargano sempre più. Risolto anche il problema di fare

i trefoli e le funi di lunghezza assai notevoli (i fili allora disponibili arrivavano soltanto a poche decine di metri) senza ricorrere a saldature ma, si direbbe al giorno d'oggi, ad « impalmature », ossia utilizzando soltanto lo sforzo d'attrito generato dalla pressione dei fili (o dei trefoli) avvolti gli uni sugli altri, già nel maggio-giugno 1834 Albert arrivò a fabbricare le prime due funi di sollevamento, composte di tre trefoli, ciascuno dei quali formato da quattro fili di ferro del diametro di 3,5 mm: non vi era anima di alcuna sorta. Verso la fine di luglio del 1834 esse furono montate nel pozzo Carolina presso Clausthal, di circa 484 m di profondità, a tratti variamente inclinati e provvisto di un tamburo-argano di sollevamento di soli 2,20 m di diametro: il successo fu completo nei riguardi della durata raggiunta senza che si producessero rotture.

Ma non solo si ebbe un grande successo tecnico nei confronti della durata delle catene, ma anche il successo economico fu molto notevole nei riguardi sia delle funi di canapa che delle catene di ferro.

Ciò spiega il rapido diffondersi delle funi di ferro (Albert non solo non fece misteri sui suoi procedimenti, ma anzi ne diffuse la conoscenza senza prender brevetti di sorta) nell'Harz, nelle altre regioni della Germania ed anche all'Estero, in Inghilterra.

(Nei soli due anni dal 1834 al 1836 vennero fabbricati circa 24 chilometri di fune di ferro nello stesso luogo (laveria del pozzo Dorothea, sempre presso Clausthal) e con lo stesso metodo adoperato da Albert per la prima fune).

Ricerche storiche posteriori ad Albert hanno dimostrato che la fune metallica a trefoli di Albert ha avuto diversi precursori (si ricordano ad es. la fune di bronzo trovata a Pompei, la fune a trefoli disegnata da Leonardo), ma si tratta di esempi che o sono rimasti isolati e rapidamente dimenticati oppure sono stati limitati a scopi speciali e ristretti, per cui non ne è seguito un riconoscimento esteso dei vantaggi e quindi una diffusione apprezzabile.

Albert non può quindi chia-

marsi l'inventore della fune metallica, ma può indicarsi come colui che per il primo ha adoperato la fune metallica per superare un problema di *resistenza a fatica*, ossia di resistenza alle sollecitazioni ripetute, che egli con chiarezza ha individuato e definito nei suoi caratteri e che con un decennio di ricerche sperimentali in laboratorio e sugli impianti è arrivato a risolvere, battendo la strada, sino ad allora pressochè negletta, della fune di filo di ferro.

Può essere interessante ricordare che, nella stessa epoca delle vere prime ricerche a fatica su elementi di metallo di Albert, veniva esaminato per la prima volta in un territorio non lontano dall'Harz, luogo delle prove di Albert, il comportamento dei metalli sotto una sollecitazione di una sorta che potrebbe ritenersi come un caso limite della sollecitazione a fatica.

Vogliamo alludere alle prove a durata, ossia sotto carico costante (6) che Vicat ha compiuto tra il 1830 e il 1833 a Grenoble sui dei fili di ferro non ricotto.

Invero la sollecitazione a durata, ossia sotto carico permanente (« a durata »... l'eternamente dura (6) di Dante), può pensarsi come il caso limite di sollecitazione cui tende la sollecitazione ripetuta sotto carico oscillante tra due valori fissi quando, in successive prove su diversi campioni, mantenendo nelle varie prove ad es. costante la sollecitazione massima raggiunta in ciascun ciclo di carico, si faccia tendere il valore della sollecitazione minima al valore, costante, della sollecitazione massima.

Le prove di Vicat furono anche le prime vere prove « a scorrimento », perchè egli prese nota delle deformazioni che si producevano in diversi fili di ferro uguali, ma caricati con pesi differenti, durante un tempo di poco meno di tre anni (le esperienze cessarono infatti nel marzo del 1833): siamo così già a prove a durata estendentesi a circa 25.000 ore.

Vicat fu, come ingegnere dei Ponts et Chaussées, fra i primi che si occuparono di controllare l'esecuzione e di collaudare i ponti sospesi costruiti con cavi metallici: egli condusse le sue ricerche

per risolvere i dubbi che gli si presentarono sulle capacità dei cavi di portar carichi per lungo periodo di tempo e specialmente il dubbio che, col tempo, le deformazioni potessero diventar troppo rilevanti.

Dubbi naturali ma che però, mentre da una parte le prove di Vicat insegnarono come potevano essere dissipati, dall'altra l'esperienza diretta doveva dimostrare infondati, sempre che le sollecitazioni fossero contenute entro opportuni limiti e fossero applicate adatte provvidenze per proteggere le funi di filo di ferro dall'azione dell'ambiente.

Ed invero si può citare che un ponte sospeso tra quelli di cui si occupò Vicat, il ponte della Saône sull'Isère messo in esercizio nel 1833 è durato, con soltanto rinnovamento del piano stradale, fino al giugno del 1940, ossia fino a quando fu distrutto nella seconda (ed il Signore voglia proprio che non ve ne sia una terza) guerra mondiale: si può per di più dire che nel ponte sul Rodano fra Tain e Tournon, a due campate, costruito da Seguin nel 1827, nel 1954 (7) erano ancora in esercizio le funi di una campata.

Le prove di Vicat furono eseguite su fili, perchè a quell'epoca i ponti sospesi, che si cominciavano a costruire in Francia e altrove, avevano i cavi di sospensione formati da fasci di fili paralleli: solo assai più tardi, per superare le non lievi difficoltà di far lavorare ugualmente i fili, si passò ai cavi composti con funi spirodali.

Dalle sue prove a durata, confrontate con i risultati di circa un decennio di esercizio dei primi ponti sospesi (il primo ponte sospeso con cavi composti di fili di ferro fu costruito da Dufour a Ginevra nel 1822), Vicat trasse elementi per proporzionare i cavi di fili di ferro dei ponti sospesi, onde questi resistessero a durata, ossia a fatica con oscillazione di carico infinitesima, e arrivò a concludere che sotto questo riguardo gli stessi cavi erano preferibili alle catene di ferro forgiato; parallelamente, pressochè nello stesso tempo, Albert, dalle sue ricerche a fatica estese per circa un decennio, arrivò a concludere che poteva risolvere il suo problema

meccanico degli organi di trazione per gli argani da miniera con l'impiego di un'adatta fune di ferro, con una sicurezza che non poteva raggiungere con le catene di ferro.

Ritornando, dopo la digressione con i cavi a fili paralleli di Vicat, alle funi propriamente dette, concluderemo allora questi ricordi storici col dire che la fune metallica, considerata come organo delle macchine ad impiego sistematico per realizzare uno scopo chiaramente definito, è direttamente legata al quadro generale della resistenza a fatica dei metalli, per essere sorta in seguito ad una chiara intuizione dell'effetto della fatica confermata con le prime, in ordine storico, prove sistematiche a fatica, mentre a base dell'introduzione della fune metallica come nuovo organo fu posta la sua controllata capacità di resistenza a fatica, ben superiore a quella degli organi prima adoperati per realizzare lo stesso compito cui la fune stessa era destinata.

Caratteristiche particolari dello stato di sollecitazione nelle funi metalliche e loro collegamento con la resistenza a fatica in generale.

Ora che abbiamo visto come la fune metallica è entrata nella tecnica costruttiva e vi si è diffusa ed affermata rapidamente per le sue emergenti proprietà di resistenza a fatica, possiamo domandarci: come mai allora, dopo circa un secolo e un quarto, siamo ancora qui ad occuparci delle funi metalliche proprio nei riguardi della resistenza a fatica?

Come mai tanti convegni precedenti sull'argomento, ad es. da quelli sia pur ristretti, inglesi e tedeschi ed anche americani di prima della seconda guerra mondiale, alla Conferenza Internazionale sulle Funi nelle Miniere del 1950 a Lemington-Spa in Inghilterra, come mai tante ricerche di laboratorio sulle funi e sui fili componenti, tanti esami e controlli di funi in esercizio e prove e riprove sugli impianti, come mai tanti studi teorici sulle funi?

Ma è che anche con le funi me-

talliche è avvenuto quanto è accaduto in moltissimi campi della tecnica.

Un successo iniziale ha aperto la via alle realizzazioni più ardite ancora di quelle già effettuate, mentre la conoscenza ancora troppo superficiale dei parametri che influivano decisamente sul successo non ha avvertito che ci si allontanava dalle vie che avevano permesso di raggiungere il successo stesso.

E così si sono verificati gli insuccessi: ed allora si è cercato di esaminare sotto diversi aspetti quali erano state effettivamente le condizioni di esercizio e, tenute presenti queste, come si era proceduto nel progetto o nella scelta della fune, nella costruzione della stessa e dei suoi fili componenti e nel suo impiego in opera.

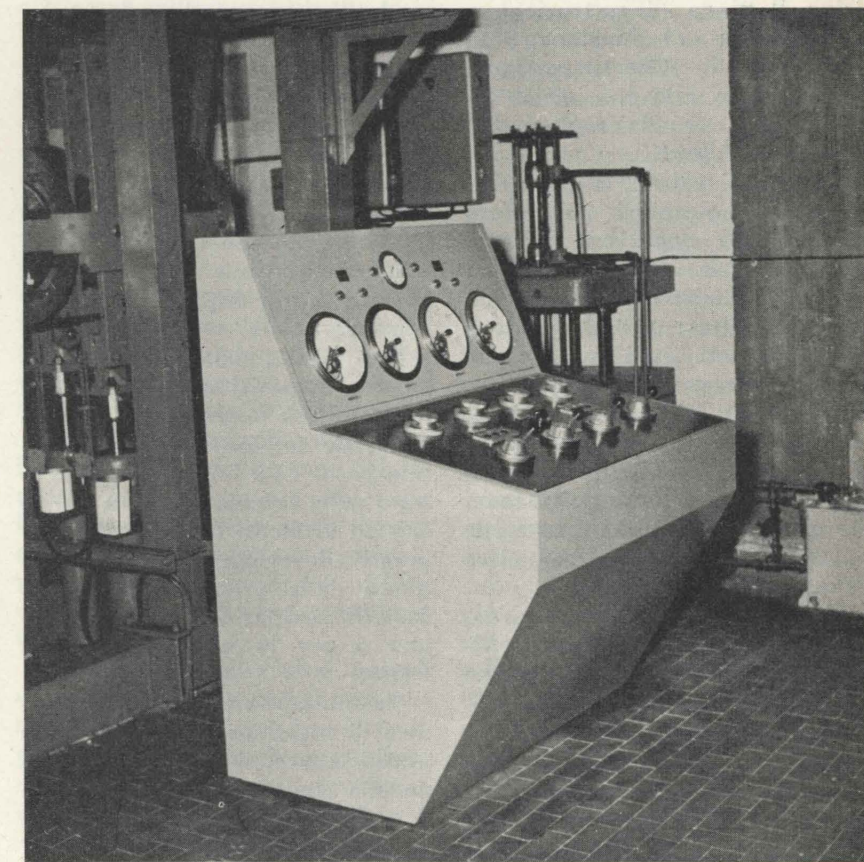
Da queste analisi gli spiriti più elevati hanno dedotto che per chiarire le cause degli insuccessi o viceversa il modo col quale si potevan di nuovo ottenere successi, era necessario affrontare ricerche teoriche e sperimentali.

Così si è arrivati a svolgere, in oltre settant'anni dalle prime prove di Biggart del 1809, un complesso veramente notevole di ricerche sistematiche che hanno chiarito diversi punti: parecchio però resta ancora da fare, perchè le variabili influenti sul fenomeno sono molte, per dir di quelle fino ad ora individuate, mentre, come spesso accade nelle indagini sperimentali, altre sulle quali fino ad allora non si è posata l'attenzione, potranno in seguito essere riconosciute come importanti.

Si potrebbe dire che è come nello studio delle malattie degli esseri viventi: continuamente affinandosi i mezzi di indagine, allargandosi le conoscenze anatomiche e fisiologiche, nuove cause sempre più profonde, si potrebbe dire sempre più ascose, più sottili, vengono riconosciute come capaci di dar luogo a disturbi di una certa sorta.

D'altra parte, per attenerci più propriamente ai risultati di Albert, non possiamo fare a meno di osservare che il grande succes-

Fig. 1 - Pannello di comando idrodinamico della nuova macchina per prove di fatica su funi del Politecnico di Torino.



so di Albert presso i suoi contemporanei va inquadrato anche nello stato del funzionamento dell'estrazione dalle miniere dell'Harz a quei tempi.

Erano secoli che si sopportavano nell'estrazione dei minerali tutti gli inconvenienti delle funi di canapa e delle catene di ferro non solo diretti, per il logorio e il deterioramento delle prime o per le rotture improvvise delle seconde, ma anche indiretti, specialmente nel caso delle catene, per la necessità dei lavori di ripristino dei pozzi e delle benne dai danneggiamenti prodottisi in seguito alle rotture delle catene stesse.

L'aver, se non fatto sparire del tutto, per lo meno ridotto in grande misura i predetti inconvenienti, ha rappresentato non soltanto un notevolissimo vantaggio economico, ma anche un grande sollievo morale per i funzionari delle miniere per averli pressochè liberati dai pensieri e dalle preoccupazioni giornaliere derivanti dalla necessità di mantenere l'efficienza del servizio e, in modo particolare, dai pericoli cui erano soggetti gli operai nei continui lavori di riparazione dei pozzi.

Ma, guardando un po' più da vicino il modo di costruzione e le condizioni di funzionamento delle funi di Albert, possiamo anche vedere alla luce delle attuali conoscenze le ragioni del successo di Albert.

La fune di Albert, si è già detto, era composta di tre trefoli, ciascuno dei quali era formato di 4 fili del diametro di 3,5 mm: questa formazione probabilmente è stata adottata per derivazione da quelle delle funi vegetali che si componevano (e si compongono anche tutt'ora) con tre legnoli. Il materiale era ferro trafilato: la resistenza prescritta era 53 kg/mm². Il diametro della fune, che non aveva anima nè tessile nè metallica, risultava di circa 18 mm.

L'avvolgimento era concorde, ossia del tipo che fu poi detto Albert: non si sa per quale ragione Albert abbia adottato tale avvolgimento mentre le funi vegetali si costruivano (e si fabbricano tutt'ora) con avvolgimento incrociato. Forse Albert ha trovato più facile comporre a mano (la com-

posizione a macchina è cominciata alquanto dopo il 1834) la fune avvolgendo i trefoli nello stesso senso dei fili nei trefoli che non in senso contrario (come per l'avvolgimento incrociato). Il passo dei fili nei trefoli era piuttosto lungo, circa 15 volte il diametro dei trefoli.

La puleggia sulla quale si avvolgeva la fune posta in testa al pozzo Carolina aveva un diametro di 12 piedi (probabilmente poco diversi dai piedi prussiani di 0,314 m) ossia di circa 3,70 m, mentre il tamburo sul quale doveva avvolgersi la fune aveva un diametro di 7 piedi, ossia di circa 2,20 m.

Si aveva quindi, sulla puleggia sulla quale la fune si svolgeva ed avvolgeva ad ogni corsa, un rapporto diametro puleggia/diametro filo di circa 1080 ed un rapporto diametro puleggia/diametro fune di circa 210: sul tamburo sul quale la fune si avvolgeva in una corsa e si svolgeva nella successiva si avevano i corrispondenti rapporti 630 e 122.

La sollecitazione massima statica di trazione, tenuto conto della componente del peso della fune, era di circa 9,5 kg/mm² con un grado di sicurezza alla sola trazione di 5,5, escluse le resistenze allo strisciamento nel pozzo leggermente inclinato.

La velocità di sollevamento era di soltanto circa 1,5 m/sec⁽⁸⁾ [ma forse meno⁽⁹⁾]: le azioni dinamiche dovevano essere quindi ridotte, tanto più che il comando era effettuato con una ruota idraulica (per di sopra, doppia per ottenere l'inversione del movimento).

Non risulta dalle fonti che ho avuto a disposizione se le pulegge e il tamburo fossero di legno o di materiale ferroso: sembra probabile però, date le dimensioni e lo stato della tecnica di allora e dato che gli elementi di comando adoperati dovevano essere ancora quelli delle precedenti catene o funi di canapa, che fossero di legno o per lo meno rivestiti di legno.

Va notato ancora che Albert dice di ingrassare la fune con un grasso tenace, da applicare a caldo, ma che resti pieghevole dopo il raffreddamento per proteggere la fune dall'umidità.

Appare evidente da quanto precede, senza diffonderci in altri dettagli, che Albert aveva avuto anche una felice intuizione sul modo di costituire la fune: alla luce dell'esperienza ormai acquisita da molti decenni di esercizio, si deve dire che Albert doveva attendersi risultati favorevoli.

Invero nelle funivie, dove ormai non solo in Italia ma anche all'Estero, da poco meno di un quarantennio, si sono applicati per le funi dell'anello traente rapporti diametro puleggia/diametro fune e diametro puleggia/diametro filo dell'ordine (od anche un po' inferiori) di quelli corrispondenti al caso di Albert, con gradi di sicurezza minimi di cinque e pulegge rivestite di materiale cedevole, si sono raggiunte in molti casi con funi di formazione generalmente concorde (ossia, come si denomina, appunto da chi per primo l'ha adoperata, Albert) durate assai elevate, di molti anni (anche più di dieci per qualche fune zavorra, benchè di impianto a forte traffico), pur avendosi diverse circostanze sfavorevoli rispetto ad Albert: velocità della fune molto più alta e quindi azioni dinamiche sia per effetti diretti sia per fenomeni vibratorii ed oscillatori accessori probabilmente assai più notevoli, sollecitazioni secondarie di flessione e pressione della fune sui rulli dei sostegni, fili assai più piccoli di quelli di Albert e quindi azioni locali di Hertz sulle pulegge corrispondentemente più alte, resistenza del materiale di gran lunga più elevata di quella del materiale adoperato da Albert, circostanza quest'ultima che secondo quanto risulta dalle esperienze di laboratorio, non è certo favorevole ad una maggior durata (a pari grado di sicurezza ed a pari condizioni di avvolgimento sulle pulegge).

Si è visto come Albert sia arrivato alla fune di ferro per superare un effetto di sollecitazione ripetuta, come si suol dire a « fatica » [pare che questo termine si debba a Poncelet⁽¹⁰⁾].

Anche se ricerche compiute da Gough nel 1927-28⁽¹¹⁾, un secolo quasi preciso dopo di Albert, fanno pensare, per le catene di sollevamento in ferro forgiato di Albert, per lo meno nell'esercizio,

non proprio soltanto ad un puro fenomeno di cedimento per fatica, senza cioè alterazione micrografica del materiale, ma anche ad una concomitante fragilizzazione progressiva di una sottile pelle del ferro componente sotto l'azione di ripetuti piccoli colpi che ha favorito l'insorgere della rottura, rimane però sempre il fatto che Albert si è trovato di fronte ad un cedimento che egli ha correttamente attribuito a sollecitazione ripetuta.

Ma è pure importante ricordare che egli ha pensato che l'effetto produttore quel cedimento per sollecitazione ripetuta era un effetto locale, e che, come tale, cercò di porvi rimedio con provvedimenti locali: invero prima di arrivare alla fune provò ad applicare agli anelli della catena allora in uso, nei punti di articolazione degli anelli stessi, delle guarnizioni metalliche, senza però successo perchè le guarnizioni o cedevano o si spostavano.

Ma non solo ad effetto locale pensò Albert, bensì, come abbiamo detto, anche ad un effetto di danneggiamento o frattura progressiva: ed invero cercò di porre riparo alle rotture delle catene anche componendone gli anelli con quattro anelli aventi barra componente con sezione pari ad un quarto di cerchio, opportunamente sovrapposti ed uniti per saldatura parziale per evitare, con una soluzione di continuità, che la frattura o l'indurimento si propagasse dai punti di pressione posti all'interno dell'anello a tutto lo spessore dell'anello stesso, tentativo non riuscito perchè la saldatura risultò in molti anelli completa per cui gli stessi si ruppero dopo non molto tempo.

Questi due aspetti dell'effetto della fatica, danneggiamento locale e sua propagazione, sono ormai riconosciuti come i dominanti, anzi come i caratterizzanti lo stesso effetto.

Sotto la ripetizione del cimento si producono nell'interno dei cristalli più sollecitati, sembra anzi ben presto, dei primi estremamente piccoli submicroscopici scorrimenti plastici secondo piani di più facile scorrimento: questi scorrimenti si accumulano a grup-

pi dando luogo alle bande di scorrimento più visibili.

Senza voler entrare in dettagli più profondi di questo meccanismo del prodursi della prima crepa, dettagli sui quali altri più ferrato di me in quell'affascinante materia che è la Scienza dei metalli potrebbe meglio dire la sua parola, accenneremo soltanto che secondo alcuni, in conseguenza di questi scorrimenti si hanno incrudimenti, ossia esaurimenti della capacità di deformazione così che, ad un certo punto, in seguito ad un accumularsi estremamente locale di questi scorrimenti e relativi incrudimenti si produce una piccola submicroscopica crepa. Moderni ragionamenti basati sulla costituzione atomica dei metalli, sulla presenza di vacanze e di dislocazioni, sul loro progredire o camminare col ripetersi delle sollecitazioni e sulla possibilità di successivo blocco giustificerebbero le ipotesi indicate.

A questa prima crepa submicroscopica, tendente in generale a prodursi secondo piani di massimo scorrimento, col ripetersi del cimento, se ne aggiungono via via altre in punti vicini, mentre la prima si ingrandisce: così si passa alla crepa microscopicamente visibile.

Del resto ricerche recentissime⁽¹²⁾ condotte con osservazioni col microscopio elettronico eseguite secondo una speciale tecnica hanno dimostrato che i suddetti scorrimenti nei cristalli più sollecitati danno luogo alla formazione di piccole cavità, le quali, se la sollecitazione ripetuta è sufficientemente alta, aumentano progressivamente di numero fino a riunirsi in parte, dopo di che si rende visibile una prima piccola crepa.

Dalla prima piccola crepa visibile si arriva, col ripetersi del cimento, successivamente alla vera frattura propagantesi generalmente secondo una direzione approssimativamente normale a quella della massima tensione principale di trazione.

Anche se vi sono altri quadri o modelli per spiegare il fenomeno della frattura per fatica, tutti però concordano negli aspetti fondamentali di estrema localizzazione e di progressività.

Come è noto, una delle conse-

guenze più notevoli di questi aspetti del cedimento per fatica sul comportamento a fatica degli organi metallici è la grande importanza che hanno le concentrazioni di sollecitazione e i danneggiamenti localizzati (ad es. per corrosione, per corrosione-strisciamento, per incrudimento o meglio indurimento locale).

Ed invero in un punto di concentrazione di sollecitazione, anche se ivi la sollecitazione nominale calcolata con le comuni formule di Navier-Saint Venant valide per elementi cilindrici o prismatici è inferiore, magari anche di assai, al limite di resistenza a fatica proprio del materiale componente, sotto la ripetuta applicazione del cimento si può innescare quello che si dice un « nucleo » di frattura progressiva per fatica.

Ciò porta alla necessità, nei pezzi soggetti a tal sorta di sollecitazione, di applicare, sia per il disegno come per la loro lavorazione ed anche per la scelta del materiale, provvedimenti che riducano per quanto è possibile le dette cause di concentrazione, adottando, ad es. nei cambiamenti di sezione, raccordi come si suol dire il più « generoso » possibile, compatibilmente con le necessità costruttive.

Può essere curioso ricordare che questo provvedimento, che ancora non infrequentemente si vede trascurato con la conseguenza della produzione di rotture per fatica, già era stato indicato nel 1843⁽¹³⁾ da W. J. Macquorn Rankine e più chiaramente nel 1849 da James E. McConnel per il raccordo tra fuselli (ossia perni) e corpo degli assali ferroviari onde evitare le rotture in esercizio.

Volendo quindi, dopo aver ricordato come la fune metallica è nata, nel modo indicato, dalle prime ricerche sulla resistenza a fatica, porre la resistenza a fatica delle funi metalliche nel quadro più generale della resistenza a fatica dei metalli, dobbiamo considerare quali sono le possibilità di localizzazione del cedimento per fatica che si hanno in una fune.

La fune è composta di fili di acciaio teoricamente cilindrici. Come tali i fili, non presentando

variazioni rapide di sezione o di forma, almeno fin quando non sono intervenute alterazioni locali di forma prodottesi nel funzionamento della fune, non dovrebbero di per loro stessi presentare punti preferenziali di « nucleazione » del cedimento per fatica.

Però i fili reali non sono solidi cilindrici, o per essere più esatti torici elicoidali, composti di un materiale continuo perfettamente omogeneo ed isotropo, ma possono presentare irregolarità più o meno locali, geometriche, metallurgiche, di superficie o disomogeneità interne di varia sorta.

Ma non vogliamo trattare di queste cause che possono favorire l'inizio locale di un danneggiamento per fatica, poichè l'evitarle, o per lo meno il ridurle al minimo possibile, sia pur il ridurle inteso a seconda dell'impiego della fune, riguarda di più la metallurgia e tecnologia della fabbricazione dei fili che non la costituzione della fune.

Se prendiamo la fune di per se stessa, se noi vogliamo considerarne il comportamento a fatica, dobbiamo, come si fa quando si vuol studiare a fatica un materiale di per se stesso, anche se si presenta sotto la forma di una provetta non cilindrica ma pur sempre a simmetria assiale, prendere in esame il comportamento della stessa fune sotto sollecitazioni semplici analoghe a quelle corrispondenti ai casi elementari di Saint Venant relativi ad un cilindro carico soltanto sulle basi.

Invero ad es. il cimento a flessione ripetuta di una fune tesa su di una puleggia od un supporto fa intervenire, oltre alla sollecitazione assiale della fune, la reazione del supporto stesso ed il suo modo di agire con carichi trasversali, ed eventualmente anche longitudinali, sulla fune.

Come è ben noto dall'esperienza di laboratorio e di esercizio, il comportamento a flessione di una fune su una puleggia dipende, oltre che dal modo come è costituita la fune, anche ad es. dalla conformazione della gola della puleggia e dalla deformabilità elastica del materiale che ne costituisce il fondo, perchè da questi elementi dipende l'anda-

mento della distribuzione dei carichi trasversali sulla fune.

Può essere interessante ricordare a questo proposito che nel 1850, quando Gustavo Adolfo Hirn, il noto fisico alsaziano che compì esperimenti per la determinazione dell'equivalente meccanico della caloria, ideò, insieme al fratello Ferdinando, e studiò la prima trasmissione telodinamica per trasmettere per mezzo di una fune metallica potenza meccanica fra due punti assai lontani, trovò forti difficoltà per evitare che la fune metallica e le pulegge di ghisa sulle quali esse si avvolgeva oppure dalle quali era sostenuta, si logorassero rapidamente: egli riuscì a superare il grave inconveniente, applicando sul fondo della gola un rivestimento di guttaperca⁽¹⁴⁾.

(Mi sia permesso rammentare che « Delle trasmissioni telodinamiche di Hirn » è il titolo di una tesi di laurea⁽¹⁵⁾ presentata da Galileo Ferraris al Politecnico di Torino nel 1869, ossia poco meno di cento anni or sono: questo ricordo può quindi forse inserirsi non del tutto inutilmente nella celebrazione dei Cento anni dell'Unità d'Italia, perchè sembra dire che verso il principio di questi Cento anni, chi operando in altri campi della fisica doveva più tardi, entro gli stessi Cento anni, dar il modo di realizzare la trasmissione economica a grande distanza dell'energia, si sentiva già portato a trattare degli stessi problemi con i mezzi allora noti).

Per quanto ho detto, lo studio a fatica come comunemente fatto a flessotrazione delle funi con il sottoporle a piegamento ripetuto su pulegge non mi sembra, spero mi sia permesso dirlo, un vero studio a fatica della pura fune: forse può meglio dirsi uno studio del comportamento a fatica dell'insieme fune-sostegno.

Per vedere la fune da sè sola nel quadro generale della resistenza a fatica, occorre cominciare dal caso più semplice, quello della sollecitazione assiale, e, dato il carattere locale del cedimento per fatica, vedere, come si fa con le provette a superficie rettificata sia pure a simmetria assiale ma non perfettamente cilindrica, se esistono delle cause particolari lo-

cali di inizio del cedimento a fatica e qual'è l'importanza delle cause stesse.

Si dovrà allora, similmente a quanto si fa con le dette provette, vedere se esistono dei punti o delle zone di esaltazione della sollecitazione e cercare di determinare il valore teorico, calcolato nell'ipotesi di validità della legge di Hooke, delle esaltazioni stesse rispetto ad una « sollecitazione nominale » di riferimento, per es. rispetto alla comune sollecitazione nominale a trazione della fune data dallo sforzo assiale diviso per la somma delle sezioni rette dei fili componenti la fune stessa.

Ciò per avere un primo punto di riferimento valido per tutte le sorta di formazioni ossia di composizioni delle funi, che ne permetta un confronto nei riguardi del pericolo di cedimento, per quanto il comportamento effettivo a fatica sarà poi influenzato da quelli che noi potremmo chiamare adattamenti plastici ed anche collaborazioni locali attenuanti gli effetti delle dette esaltazioni.

Una fune metallica è composta, come si è detto, di fili.

Se prendiamo lo spezzone di fune soggetto a sforzo assiale generale e cerchiamo di vederne le condizioni di vincolo, vediamo che ad ogni filo corrispondono, nello spazio, sei componenti dell'azione interna. Supposto che i fili non appoggino in alcun modo l'uno sull'altro, tenuto conto delle sei condizioni di equilibrio esterno, le incognite iperstatiche in una fune sarebbero allora date dal numero dei fili meno uno moltiplicato per sei.

Di qui, tenuto conto delle condizioni di congruenza alle estremità del tratto di fune considerato, si può arrivare, come è stato fatto in parecchie ricerche, molte volte con l'aiuto di ipotesi semplificative, alla determinazione delle azioni interne sui fili.

Da diversi studi risulta che i fili con diversa giacitura possono avere sollecitazione anche sensibilmente diversa, sì che si hanno fili con sollecitazione più alta degli altri e più elevata della media nominale; si possono perciò avere, se non delle vere concentrazioni di sollecitazione nel senso puro, per lo meno degli addensamenti

di sollecitazione in certi elementi della fune.

Anche non tenendo conto dei mutui appoggi dei fili, nel caso di sollecitazione assiale a fatica con sforzi massimi non molto elevati che non facciano intervenire le, non grandi però, proprietà plastiche dei fili, già lo stesso modo di costituzione della fune dà luogo quindi, se non proprio ad una nucleazione, però ad un favorire del cedimento per fatica, così che questo ha possibilità di prodursi sotto sollecitazione a trazione nominale della fune più bassa del limite di resistenza a fatica assiale dei fili sotto una sollecitazione variante, nel tempo, nello stesso modo del carico assiale della fune.

È questo un fenomeno che trova conferma in risultati di prove a fatica eseguiti su elementi iperstatici presentanti cioè vincoli sovrabbondanti come chiodature a più righe⁽¹⁶⁾ od anche anelli⁽¹⁷⁾ od anelli di catena⁽¹⁸⁾.

Però in realtà i fili di un tratto di fune non sono soltanto vincolati insieme alle estremità, ma trovano mutuo appoggio. Si può trattare, ad es., in una fune spirale dell'appoggio dei fili di uno strato su quelli del sottostante ma anche, a seconda dell'inclinazione dell'elica media, dell'appoggio laterale fra fili dello stesso strato, mentre in una fune ad uno strato di trefoli, oltre ad avere gli analoghi appoggi tra i fili di ciascun trefolo, possiamo avere appoggi dei trefoli sull'anima o fra i trefoli stessi. Se poi si hanno più strati di trefoli, si hanno anche appoggi dei trefoli di uno strato su quelli del sottostante.

Questi mutui appoggi fra i fili danno luogo a reazioni fra gli stessi fili, non soltanto normali, ma in realtà anche spesso tangenziali per le resistenze di attrito che si possono opporre ai moti relativi fra i fili prementisi.

Possiamo ricordare, giacchè siamo in Torino, che è trascorso oltre mezzo secolo da quando, nel 1909, Panetti presentava a Torino all'Accademia delle Scienze una memoria sul modulo elastico delle funi, nella quale teneva conto, ritengo per il primo, delle pressioni fra i fili.

Nei punti d'appoggio di un filo

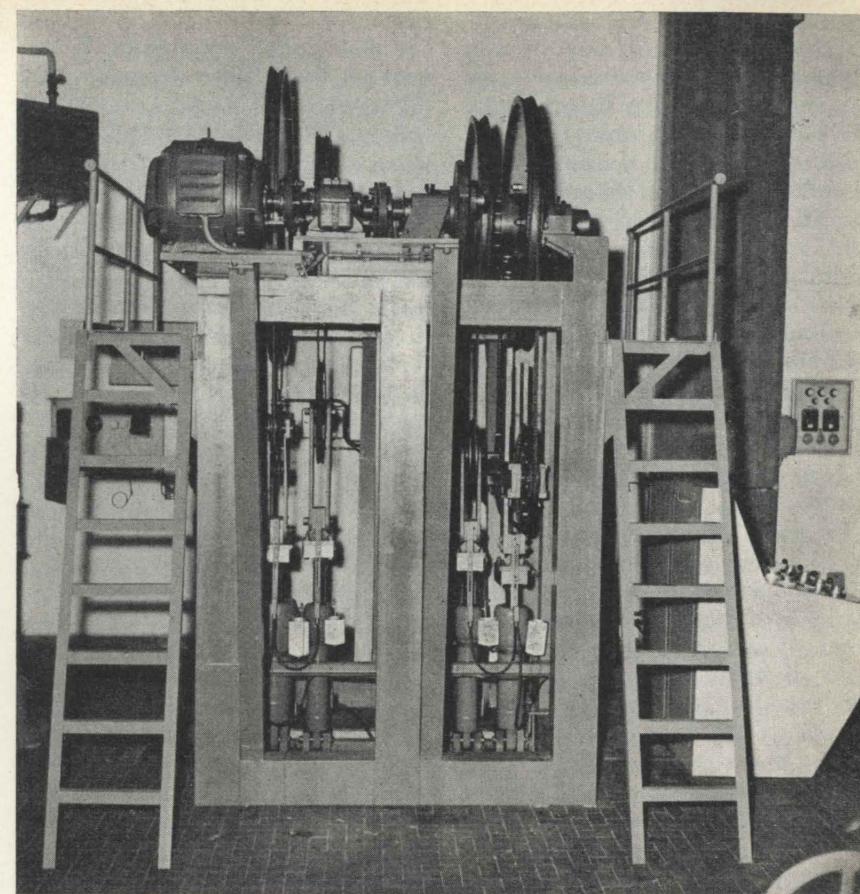


Fig. 2 - Vista della nuova macchina per prove di fatica su funi del Laboratorio Prove Materiali del Politecnico di Torino.

sull'altro od anche di un trefolo sull'altro, si aggiungono quindi altre reazioni interne nella struttura già multiplamente iperstatica.

È chiaro che in queste condizioni la determinazione dello stato di sollecitazione effettivo nella fune diventa oltremodo complicata, tanto più che dove i fili premono gli uni su gli altri intervengono cedimenti locali corrispondenti alle pressioni di contatto ad andamento in realtà non lineare con la pressione, ed eventualmente crescenti col numero delle ripetizioni di carico.

Soltanto per alcuni casi semplici, relativi a funi spirali, recentemente studiosi giapponesi⁽¹⁹⁾ sono arrivati, con alcune semplificazioni, ad ottenere le sollecitazioni nei fili componenti considerando anche le pressioni di contatto fra filo e filo.

Sembra però non improbabile che la conseguenza di questi vincoli interni sia quella di tendere ad attenuare le disuniformità de-

gli sforzi, per lo meno di trazione, fra i diversi fili, perchè l'entrata in azione di essi costituisce un avvicinarsi all'asta unica.

D'altra parte però le pressioni mutue che si esercitano sui fili possono dar luogo, per es. nelle formazioni nelle quali fili o trefoli si incrociano, specie ad es. in quelle nelle quali i fili di uno strato non ricevono ad es. una reazione continua d'appoggio da quelli dello strato sottostante, ad ulteriori sollecitazioni di flessione, taglio, ecc. nei fili stessi: di conseguenza possono, con certe formazioni di fune, sorgere delle cause di aumento della sollecitazione in diversi tratti dei fili per cui il cedimento per fatica può trovarsi favorito, così da venir a prodursi sotto una tensione a trazione nominale media della fune ancor più bassa di quella, più sopra indicata, corrispondente al non considerare gli appoggi fra i fili.

Le sollecitazioni di trazione, flessione, torsione, taglio nei fili fino ad ora considerate, sollecita-

zioni che potremmo chiamare sollecitazioni principali, pur essendo variabili magari abbastanza rapidamente specie nelle funi a molti fili piccoli, non si può dire che comprendano vere concentrazioni di sollecitazione del tipo di quelle che si presentano in un intaglio con fondo a raggio relativamente molto piccolo, ossia a stati di sollecitazione nei quali la tensione raggiunge, in un punto del solido sottoposto a cimento, un massimo assai più elevato di quello dato dalle comuni relazioni di Navier, ma diminuisce con gradiente molto forte allontanandosi dallo stesso punto.

Invece, in conseguenza delle pressioni che si sviluppano in corrispondenza degli appoggi mutui fra i fili, si manifestano concentrazioni di sollecitazione: esse sono però di una natura diversa dalle concentrazioni di tensione corrispondenti ad es. ad un intaglio in una barra rettilinea.

Invero, in un punto d'appoggio di un filo su un altro, la pressione fra i fili dà luogo allo stato di tensione corrispondente alle sollecitazioni di contatto del tipo di quelle che si producono in generale fra due solidi premuti l'uno sull'altro, determinate la prima volta, in modo fondamentale, da Hertz (proprio lo stesso Hertz che scoprì le onde elettromagnetiche, del quale i suoi biografici dicono: morto ancor giovane al sommo della gloria) circa ottant'anni or sono e, in seguito, più estesamente studiate dai suoi continuatori [tedeschi Huber, Fuchs, e particolarmente svedesi Sundberg⁽²⁰⁾, Weibull⁽²¹⁾].

È, come è noto, uno stato di tensione triplo, ossia spaziale, a variazione molto rapida, che investe con valori notevoli soltanto un molto piccolo intorno del punto teorico di contatto.

Per determinare le tensioni di contatto con le relazioni date da Hertz e continuatori occorrerebbe determinare prima i valori delle pressioni fra fili e fili, problema analiticamente oltremodo complesso per la molteplicità delle incognite iperstatiche, in una fune tesa, che occorrerebbe determinare come sopra detto.

Di conseguenza, considerata la massima sollecitazione di contatto

come la massima sollecitazione che si sviluppa nella fune, la determinazione del rapporto fra questa tensione massima e la sollecitazione nominale media a trazione nella fune, ossia della quantità che negli studi generali sulla resistenza a fatica dei solidi presentano concentrazioni di sollecitazioni si chiama il « fattore d'intaglio teorico », è effettivamente in generale molto difficile, anche se le richiamate ricerche giapponesi per alcuni casi hanno facilitato il compito.

Va d'altro lato osservato che si tratta di stati multipli di tensione, per cui occorrerebbe piuttosto considerare come indice di pericolo teorico la cosiddetta « sollecitazione di confronto » derivata da un'appropriata teoria di resistenza, sollecitazione di confronto assai minore della massima di compressione; però non si può esser certi che, con gradiente di sollecitazione tanto forte, siano applicabili le teorie di resistenza comunemente considerate per stati omogenei o lentamente variabili di sollecitazione.

Ma vi è di più a rendere difficile l'analisi delle condizioni di resistenza a fatica dalle fune.

Ed invero, come è noto, anche in una barra cilindrica piena presentante un intaglio non basta la conoscenza del fattore d'intaglio teorico per giudicare della resistenza a fatica per es. sotto carico pulsante fra due valori minimo e massimo, ma occorre conoscere quella che si dice la « sensibilità all'intaglio » del materiale componente la barra, nelle condizioni di cimento corrispondenti all'intaglio geometrico considerato.

Occorrerebbe l'esperienza diretta per es. con provini soggetti a sollecitazione assiale variabile e contemporaneamente a pressione locale pure variabile esercitata con un altro elemento appoggiante sul primo.

Invero in stati di sollecitazione triassiali con tensioni tanto elevate di compressione come quelli in esame non sembra al momento che si possano applicare teorie, come ad es. quella di Neuber del « blocco limite » del gradiente di sollecitazione o quella più recente di Harris ed altri della « massima lunghezza di crepa non

propagantesi », per passare da un fattore d'intaglio teorico a quello effettivo.

Certo, dagli studi generali sulla resistenza a fatica si sa che la resistenza a sollecitazioni assiali ripetute di compressione è assai più grande che non l'analoga resistenza a sollecitazione di trazione, per cui, pure con tutte le riserve perchè si tratta di stato multiplo di sollecitazione, vi è anche per questo lato bene da sperare su un'attenuazione assai sensibile del pericolo del cimento a fatica denunciata dalla massima sollecitazione teorica anche « di confronto », ma la valutazione numerica sicura del vantaggio per ora ci sfugge.

D'altra parte in questi cementi con pressioni di contatto vi sono due insidie.

Una è quella che al contorno dell'area premuta vi sono, alla superficie, delle sollecitazioni di trazione: ciò risulta, con ancora maggior sicurezza che non da Hertz, dalle ricerche teoriche di Fuchs e Huber e di Sundberg⁽²⁰⁾ e di Weibull⁽²¹⁾ nonché dalle prove statiche di Auerbach (sul vetro), di Stribeck e di Palmgren⁽²⁰⁾ per i cuscinetti a sfere e in modo assai brillante recentemente dalle prove a pressione di contatto ripetuta di Kennedy⁽²²⁾.

Questa sollecitazione ripetuta di trazione si può aggiungere ad aggravare l'effetto di fatica dovuto alla sollecitazione principale di trazione e di flessione.

Però il calcolo di quella sollecitazione di trazione richiede di nuovo la conoscenza della pressione di contatto fra filo e filo, mentre il giudicare del pericolo conseguente fa di nuovo entrare in gioco le questioni già accennate relative alle concentrazioni di sollecitazione ed ai loro effetti sul pericolo di cedimento per fatica.

L'altra insidia sta nel fatto che le varie sollecitazioni che abbiamo chiamato principali (ossia di trazione, flessione, torsione, taglio) agenti nei fili prementisi gli uni sugli altri possono sollecitare i fili stessi a muoversi l'uno sull'altro quando addirittura non producono movimenti relativi fra i fili a contatto. Nascono così delle sollecitazioni tangenziali alla su-

perficie dei fili, mentre quando avvengono gli scorrimenti possono intervenire fenomeni di « corrosione-strisciamento » ai quali si sta dedicando un crescente interesse da parte di ricercatori che si occupano della resistenza a fatica in generale.

Secondo le più moderne vedute [Fenner e Field⁽²³⁾] sembra che si tratti di una sorta, si potrebbe dire, di danneggiamento sotto sollecitazione ripetuta degli strati o meglio soltanto delle asperità superficiali sulle quali si ha il contatto dei due elementi prementisi l'uno sull'altro e cementati a muoversi l'uno rispetto all'altro.

Questo cimento ripetuto dà luogo a piccole crepe superficiali che possono confluire a dare piccole particelle metalliche a superficie metallica viva che a contatto dell'ossigeno dell'aria immediatamente si ossidano. Si formano così, se si tratta di fili di acciaio, degli ossidi di ferro in particelle piccolissime che fanno da abrasivo, attivando il fenomeno di distruzione superficiale, mentre d'altra parte le superfici metalliche fresche tendono loro stesse ad essere attaccate dall'ossigeno, ossia a dar luogo a prodotti di corrosione loro pure abrasivi. Si direbbe quasi che si ha una reazione a catena o meglio dire un'azione a carattere critico come nei cedimenti per carico critico.

Le piccole crepe di cui si è detto, sotto la sollecitazione variabile tendono a proseguire se la stessa è sufficientemente intensa, e, forse, se la « piccola crepa » ha potuto raggiungere una certa « minima lunghezza propagantesi » corrispondentemente a quanto si è detto più sopra.

Effettivamente il fenomeno di danneggiamento per corrosione-strisciamento in certe condizioni può essere così intenso da portare ad una molto notevole riduzione della resistenza a fatica.

Per quanto si sa, l'intensità di questa riduzione dipende dalla pressione di contatto (e però si produce anche con pressioni assai piccole).

Occorrerebbe quindi, anche per questa ragione, poter calcolare le pressioni fra filo e filo: però al momento attuale mi sembra che le conoscenze quantitative che si

hanno sul fenomeno di corrosione-strisciamento non siano tali da permettere di apprezzare, se non in via soltanto indicativa, la riduzione di resistenza a fatica conseguente da quel fenomeno, non foss'altro perchè esso dipende dalla natura chimica e metallografica dei materiali in gioco: non mi è noto in particolare che vi siano determinazioni quantitative per l'acciaio dei fili delle funi.

Anche per giudicare del pericolo della corrosione-strisciamento tra i fili delle funi metalliche occorrerebbero del resto delle vere esperienze con elementi, ossia fili di acciaio, soggetti a fatica, ossia a sollecitazione variabile ed insieme a pressione pur essa variabile, cui si è già accennato, esperienze che però non ho notizia siano state eseguite in condizioni tali da produrre strisciami relativi.

Certo però che a queste questioni della corrosione-strisciamento nelle funi metalliche da un po' di tempo viene dedicata una sempre maggiore attenzione dai ricercatori (Usher e Sproule⁽²⁴⁾, Wyss⁽²⁵⁾, Starkey e Cress⁽²⁶⁾) che si occupano della fatica nelle funi.

Riassumendo dovremo quindi dire:

Nel caso generale di una barra rettilinea a superficie perfettamente liscia, presentante anche intagli o variazioni rapide di sezione, soggetta a sollecitazione assiale ripetuta, noi siamo attualmente in grado di conoscere per via teorica o sperimentale lo stato di sollecitazione e determinare quindi il fattore di concentrazione di sollecitazione teorico e da questo passare quindi, in base a dati sperimentali o, in una certa misura, ad induzioni teorico-sperimentali relative al coefficiente di sensibilità, al fattore di concentrazione effettivo, così da poter dedurre dalla pura resistenza a fatica di ugual sorta del materiale componente, la resistenza a fatica della nostra provetta, non più cilindrica circolare, ma con intagli.

Invece nel caso di una fune molto ci manca per passare dalle proprietà di resistenza a fatica del materiale componente (fili di acciaio), anche ammesso di aver fili sufficientemente omogenei ed uniformi, alla resistenza a fatica della fune a sollecitazione assiale.

Non vi sono attualmente a disposizione, anche dopo le già citate recenti molto acute ricerche giapponesi⁽²⁷⁾ mezzi di calcolo che, per tutte le sorta di funi, tenendo conto di tutti i fattori influenti, permettano di determinare lo stato di sollecitazione principale (per trazione, flessione, taglio e torsione) in tutti i punti dei fili di una fune soggetta anche a sola trazione assiale. E lo stesso accade per i mezzi sperimentali, anche se estensimetri estremamente stretti hanno permesso in questi ultimi tempi a ricercatori giapponesi⁽²⁸⁾ di misurare le dilatazioni sulle fibre esterne dei fili esterni di una fune spiroidale, con maggior esattezza di un tempo: nell'interno di una fune ancora non possiamo giungere a determinare le tensioni, salvo alterare la composizione della fune, per quanto forse qualche speranza la diano, per un futuro che forse non appartiene alla fantasia, i mezzi di trasmissione a distanza dei segnali estensimetrici con transistori (e forse gli isotopi radioattivi).

A dir il vero poi vi è il fatto che nei fili, per essere stati fognati ad elica magari multipla, sono presenti tensioni di cordatura in generale non sicuramente determinabili per l'intervento delle deformazioni plastiche: secondo diverse misure estensimetriche da noi eseguite (con estensimetri elettrici) queste tensioni sembrerebbero poter essere alquanto notevoli, mentre però sulla pericolosità delle stesse tensioni interne non è facile pronunciarsi perchè corrispondono a deformazioni in campo non lineare.

Ma, ammesso di aver risolto le questioni sopra accennate, non sappiamo con sicurezza come passare, in tutti i casi, alle pressioni di contatto fra i fili ed alle sollecitazioni conseguenti negli stessi, da considerare insieme alle sollecitazioni principali: non possiamo quindi arrivare a quello che potremmo chiamare il « fattore d'intaglio teorico ».

Neppure con sicurezza siamo in grado di passare da questo fattore d'intaglio teorico a quello effettivo, con un coefficiente che tenga conto della, potremmo dire, « capacità locale » del materiale

di diminuire il danno della concentrazione di sollecitazione e forse anche di migliorare con cedimenti plastici lo stato di sollecitazione principale nella fune.

Ma non siamo ancora al termine, pur essendo arrivati già alla zona di « nucleazione » eventuale della frattura per fatica.

Si deve infatti ancora preoccuparsi della possibilità di riduzione ulteriore, magari molto forte, della resistenza a fatica, per l'intervento del fenomeno pur esso estremamente locale dell'inesco del deterioramento per corrosione-fatica: il valore esatto di questa riduzione per ora però non può essere valutato.

Indirizzi delle ulteriori ricerche a fatica a carattere generale connesse con quelle a fatica sulle funi metalliche.

Da quel che abbiamo detto appare quanta differenza vi sia fra le funi soggette a fatica assiale ed il caso generale del cemento a fatica a sollecitazione assiale di una provetta anche non cilindrica, per la quale oramai dopo tanti anni (circa cento dalle prime esperienze sistematiche di Wöhler) di lavoro teorico, sperimentale ed anche applicativo siamo in grado di prevedere con una discreta sicurezza la capacità di resistenza a fatica.

Quante incertezze ancora da superare per una fune! Ed anche ammesso di aver superato in tutti i casi il punto della determinazione delle sollecitazioni principali, ci scontriamo con una sollecitazione localizzata e con un danneggiamento localizzato che possono dare l'avvio alla rottura progressiva e che dobbiamo saper valutare nel loro reale effetto.

Dopo più di centotrenta anni siamo di nuovo ritornati alla concentrazione del cemento ed alla conseguente progressiva rottura per fatica che Albert ha trovato sulla sua strada e che lo indussero alla invenzione, intesa nel senso indicato, della fune di ferro.

È che, come Galileo ha detto: « La natura per così dire non soffre d'esser defraudata ne' suoi effetti: di qualunque modo si impieghi una causa essa non è capace che di un effetto determinato ».

Dobbiamo quindi ancora studiare, ancora cercare, ancora provare per risolvere il problema della resistenza a fatica anche soltanto assiale delle funi.

Che ne sia il caso è dimostrato dai risultati fino ad ora ottenuti con prove, molto poche in verità, appunto a fatica assiale, sotto sforzo di trazione pulsante fra due valori minimo e massimo.

Invero se si prendono in esame le prove a fatica assiale su funi spirodali a fili tondi [Püngel, Gerold e Beidermühle (29)] od anche a fili sagomati ossia chiuse [Graf e Brenner (30), Klingenberg e Plum (31), Sievers e Görtz (32)] ed a trefoli con anima tessile [List (33), Beck (34)] ed anche a trefoli con anima metallica ossia Ercole, prove queste ultime avviate dal Prof. D'Armini presso il Laboratorio di Montecompatri del CISF (Centro Sperimentale Impianti a Fune), Laboratorio che, cosa di cui la Commissione per le Funicolari si sente molto onorata, è a disposizione della stessa Commissione per tutte le ricerche sugli impianti a fune, da tutte le prove risulta una resistenza a fatica assiale della fune minore, ed in molti casi assai minore, di quella che si otterrebbe dalla somma delle resistenze a fatica, sotto sollecitazione assiale variante nello stesso modo, dei fili componenti. Il rapporto fra la prima e la seconda è minore, e frequentemente molto minore, del cosiddetto « coefficiente di cordatura », ossia del rapporto fra la resistenza della fune sotto carico statico cioè gradualmente crescente fino a rottura per strappo della fune stessa e la somma delle resistenze pure statiche dei fili componenti.

Si può notare che diversi sperimentatori (non tutti, nelle loro relazioni, sono molto diffusi), specie per le funi a trefoli, indicano che le rotture si sono prodotte, in gran parte, nei punti di appoggio di un filo su un altro, cosa del resto che noi stessi abbiamo osservato nei campioni rotti durante le prove del Prof. D'Armini.

Certo in queste prove a fatica assiale delle funi, a parte ciò che sono, diremmo, debolezze intrinseche della fune, interviene come fattore spesso disturbante (come del resto nelle prove a fatica as-

siale sui fili) l'effetto dell'attacco di estremità, ma anche nei casi in cui la maggior quantità di rotture di fili si è prodotta lontano dagli attacchi, si è verificata la detta riduzione della resistenza a fatica della fune rispetto a quella dei fili.

(Ricordiamo che anche Albert, mentre riuscì subito brillantemente ad ottenere una largamente sufficiente resistenza a fatica (a flessione-trazione su puleggia), incontrò presto difficoltà nella resistenza degli attacchi estremi della fune: è ancora Galileo, ma forse anche Giambattista Vico con i suoi « corsi e ricorsi » della storia, che ritorna).

Effetto d'attacco che, come è noto, con opportuni ingrandimenti di sezione e raccordi si può invece evitare nelle prove su provini, metallici o no, pieni.

La resistenza a fatica della fune dipendendo, oltre che da quanto riguarda la resistenza a fatica dei fili stessi, da tutti i fattori di sovrassollecitazioni nei fili componenti, di concentrazione di tensione e di danneggiamenti locali ricordati ripetutamente addietro, occorrerà nelle prove a fatica assiale sulle funi far variare i diversi parametri influenti, possibilmente uno per volta, per studiarne l'effetto e l'importanza.

Certo il compito è molto vasto e reso anche difficile dalla difficoltà statistica di mantenere sensibilmente costanti i fattori che non si desidera variare: ma pensiamo che, per lo meno, incominciare con sondaggi condotti con criteri statistici sia non solo utile, ma, anzi, necessario, per chiarire il modo di funzionare a fatica di una fune, la quale è pur sempre tutta una costruzione e non, mi sia permesso dirlo, un unico campione di materiale, sia pur conformato in un determinato modo come un provino pieno con intagli, soggetto a fatica in un modo corrispondente, per quanto riguarda variazione dello sforzo nel tempo, a quello della fune stessa.

Ma come d'altro lato, negli studi generali sulla resistenza a fatica dei metalli, alle prove a fatica su provette aventi oltre che materiale, preparazione o forma diverse, soggette a sollecitazione semplice o composta di varia sor-

ta, si associano le ricerche come si suol dire « di base » sugli affascinanti meccanismi ascosti del cedimento molecolare, anzi atomico, per fatica, così alle ricerche sulle funi sarà opportuno affiancare altre « ricerche di base » sui componenti particolari del cemento delle funi a fatica.

Così dovremo cercare ad es. di fare, in modo chiaramente ordinato, prove a fatica su fili di diversa natura e preparazione in stato multiplo di sollecitazione, e su fili sottoposti contemporaneamente a pressione locale ed a sollecitazione assiale o di flessione o di torsione o combinata, tutte variabili ripetutamente nel tempo, cercando di indurre oppure no, inoltre, insieme alla pressione locale le condizioni della « corrosione-strisciamento »: in sostanza dovremo sforzarci di effettuare quelle che negli studi generali sulla resistenza a fatica corrispondono alle prove sotto i « cementi elementari componenti ».

D'altra parte, per quanto alcune ricerche di base sugli effetti delle pressioni locali siano già state compiute, molto vi è ancora da vedere: ad es. vi è da studiare l'effetto delle sollecitazioni, o, meglio, deformazioni ripetute che rientrano largamente in campo plastico, dove non solo le determinazioni delle tensioni con le teorie di Hertz e continuatori più non valgono, ma anche le vedute sull'effetto della fatica debbono essere cambiate secondo più moderne indagini (35).

Si può rammentare a questo proposito che l'acciaio dei fili delle funi, malgrado il carico unitario di rottura molto alto rispetto a quello degli acciai al carbonio ricotti, presenta una notevole capacità di deformazione plastica locale, conferitagli dalla struttura sorbitica di patentamento e dimostrata dalla rottura a cono e coppa con strizione relativamente sensibile, se non vi son difetti.

Domandiamo venia ai molto pazienti ascoltatori se li tediamo con il continuo insistere sulle azioni locali, ma gli è che studiando questi effetti noi indaghiamo cause che incidono con somma decisione sul comportamento a fatica di funi sottoposte anche a cimen-

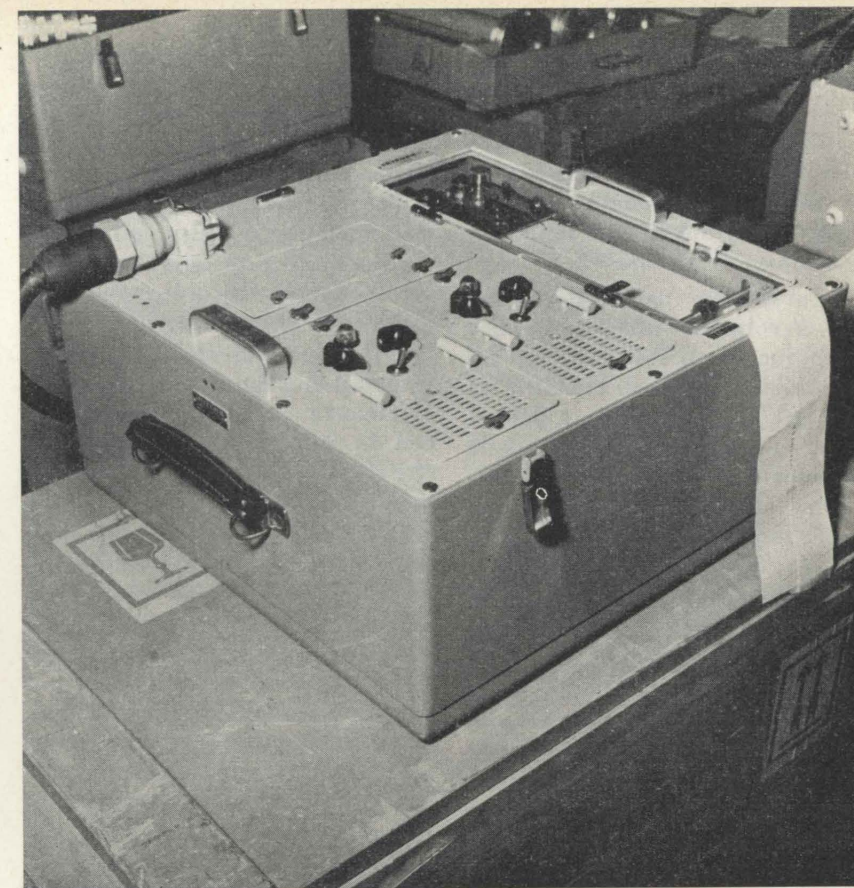


Fig. 3 - Apparecchio magnetoinduttivo per controllo funi in opera, dell'Istituto di Trasporti del Politecnico di Torino.

to di altra sorta che non la fatica assiale.

Ed invero, anche considerando il cemento a fatica di gran lunga per ora più studiato, quale quello a incurvamento su puleggia, cemento che più che a sollecitazione impressa di flessione, prodotta da un momento flettente di intensità nota, è cemento a deformazione impressa, basta ricordare ciò che circa cinquant'anni or sono (nel 1915) ha trovato Benoit (36). Dalle geniali esperienze di questo ricercatore, eseguite come è noto per risolvere il grande contrasto di vedute che egli ebbe con quel pur grande Maestro della Costruzione delle Macchine che fu Bach circa il modo di tener conto della sollecitazione di incurvatura nelle funi, risulta infatti una caduta veramente imponente della resistenza a fatica ad incurvamento su puleggia di ghisa a gola non rivestita, col passare, a pari sollecitazione unitaria nominale di trazione, dal filo al trefolo composto con gli stessi fili e dal trefolo alla

fune composta con gli stessi trefoli, caduta dovuta appunto al crescere forte delle pressioni locali nei punti di contatto fra fili e puleggia: le rotture dei fili nel trefolo e nella fune si verificavano infatti principalmente nei punti di contatto fra trefolo o fune e gola della puleggia. Benoit almeno per il confronto filo-fune confermò così il risultato che in modo meno preciso aveva trovato vent'anni prima circa (nel 1890) Biggart nelle prime prove sistematiche a fatica sulle funi che già abbiamo ricordate. D'altro lato Benoit « ritrovò » un miglioramento della resistenza a fatica passando dal trefolo oppure fune avvolti ripetutamente su puleggia di ghisa a gola nuda, al trefolo oppure fune avvolti su puleggia a gola rivestita di cuoio, miglioramento relativamente più forte per la fune: le rotture dei fili non si producevano più principalmente al contatto fra trefolo o fune e gola della puleggia.

Abbiamo detto che Benoit « ri-

trovò»: ci ricordiamo infatti che già Hirn circa sessant'anni prima ebbe a constatare, per le sue trasmissioni telodinamiche, un forte miglioramento della resistenza delle funi metalliche alla fatica dovuta all'incurvamento sulle pulegge, rivestendo la gola delle pulegge stesse di guttaperca.

Naturalmente nel caso di una fune avvolta su una puleggia o comunque su un sostegno, agli effetti delle pressioni di contatto fra fili e gola della puleggia o del sostegno si aggiungono quelli delle pressioni fra filo e filo, non più dovute soltanto alla sollecitazione assiale della fune, ma, oltre, che, in una certa misura, alla deformazione della fune, anche alla diffusione nell'interno della fune della reazione dell'appoggio.

Nell'incurvarsi della fune sulla puleggia giocheranno insieme alle pressioni fra filo e filo (o filo e puleggia), ancora più che nel caso della sollecitazione assiale, i fenomeni di corrosione-strisciamento, fenomeni che anzi con incurvamenti molto forti della fune saranno più di strisciamento intenso (come i cosiddetti « scuffing » o « scoring » sui denti delle ruote dentate): altro argomento di studio di base, questo ultimo dello strisciamento intenso di un filo su un altro.

Ma non vogliamo troppo adentrarci nelle considerazioni sulla fatica delle funi tese avvolte su pulegge o comunque soggette a carichi trasversali variabili di intensità o di posizione, perché questa questione è già stata molto trattata dagli sperimentatori di laboratorio e di esercizio e soprattutto perché ormai è ora di chiudere la mia già fin troppo lunga esposizione.

Riassumendo, in breve diremo che la fatica delle funi presenta nel quadro generale della resistenza a fatica questi aspetti degni, a mio parere, di studio più approfondito:

— Comportamento a fatica delle strutture iperstatiche, problema che, mi sia permesso dirlo, giovane di spirito, ma non più di anni, mi permetto di additare ai giovani ricercatori che sembrano

spesso essere soltanto attratti dal comportamento plastico delle dette strutture: comportamento a fatica da seguire anche nelle variazioni dello stato di sollecitazione.

— Comportamento dei materiali metallici a fatica sotto sollecitazione di pressione localizzata accompagnata da fatica sotto sollecitazione principale.

— Comportamento dei materiali metallici a fatica sotto pressione localizzata come la precedente, con in più effetti di corrosione-strisciamento oppure di strisciamento intenso.

In quanto è possibile, i detti comportamenti saranno da studiare, per poterli trasferire alle funi metalliche, anche su campioni costituiti con i fili delle funi stesse, elementi metallici che sono pur sempre i costituenti fondamentali delle funi, dotati, sotto molti aspetti, di caratteristiche particolari di resistenza, alcune favorevoli, altre sfavorevoli.

Motivi di fiducia e speranze.

Prima di chiudere vogliamo permetterci di dire che noi abbiamo molto parlato di fatica e che comunemente la parola fatica suscita un senso di apprensione quasi che fatica volesse dire cedimento, rottura.

Ma così non è. Nel celebre Vocabolario degli Accademici della Crusca edizione del MDCCXLVI si legge infatti:

« Fatica: affanno, pena che si sente e si patisce nell'operare ».

Fatica è quindi cimento, tormento, pena.

Ma la pena può anche essere sopportata se contenuta entro certi limiti.

Noi tutti che viviamo in comune abbiamo pene più o meno sensibili dalla convivenza con altri, ma, salvo casi rarissimi che entrano nella patologia, riusciamo a sopportarle migliaia e migliaia di volte nella nostra vita.

Gli è che tutto è questione di misura: « ...ditemi al Signor Vostro che la miglior cosa di questo mondo si è misura » rispose Federico II di Svevia all'ambascieria che l'interrogava in proposito (37).

Ed invero per rimanere nel campo delle funi dirò che pochi giorni or sono io ed il Prof. Greco abbiamo esaminato al Laboratorio del CSIF uno spezzone di una fune portante composta con un nucleo spiroidale ed uno strato di trefoli, che è restata in opera in una funivia per trasporto di persone dal 1927 al 1958 subendo, anche nel tratto corrispondente allo spezzone esaminato, 400.000 passaggi di vagoncini e quindi, con vagoncini a otto ruote, 3.200.000 passaggi di ruota.

Lo spezzone è stato trovato in perfetto stato di conservazione, con piccolissime incisioni sui fili.

Si può osservare che qui le ruote del carrello erano rivestite di gomma per cui l'azione locale dovuta alla pressione delle ruote stesse era molto moderata e che per di più lo spezzone era sempre stato in stazione, ma posso citare un caso ancor più convincente sulle capacità di sopportar fatica delle funi.

Per una vasta inchiesta che stiamo facendo nel nostro Istituto di Costruzione delle Macchine del Politecnico di Milano, ho ricevuto spezzoni da molte parti della Terra: fra questi spezzoni ve n'è uno, proveniente da una fune portante chiusa di una teleferica per merci italiana, che è stato in opera dal 1912 al 1958, all'aperto, subendo il passaggio di 24 milioni e mezzo di vagoncini ossia (i vagoncini sono a quattro ruote) 98 milioni di passaggi di ruote non rivestite.

Questo spezzone apparteneva alla stessa fune portante, su un campione della quale, tolto dal servizio nel 1918, Guidi eseguì le ricerche che ho ricordato in principio del mio dire.

Certo i segni di usura e di deterioramento sono in questo spezzone ben osservabili, ma si vede che la fune, come si direbbe in termine sportivo, è stata capace di incassarli.

L'importante quindi, e però anche il difficile, per le funi metalliche soggette a fatica, come per tutte le costruzioni cimentate in tal modo, è di poter arrivare a conoscere fino a qual misura può essere spinta la sollecitazione senza

che la fune stessa (come la costruzione) abbia a subire un inaccettabile deterioramento sotto il numero di ripetizioni di carico che dovrà subire in esercizio, nelle condizioni dell'esercizio stesso.

Se non supereremo quella misura avremo, sia pur con le inevitabili incertezze statistiche, buona speranza che la fune ci darà soddisfazione alla fatica che le richiediamo.

Dopo queste parole di fiducia nelle nostre amate funi, anche se ci fanno talvolta pensare e soffrire, mi permetto di accennare ad un simbolo che possiamo vedere in esse in questo Centenario dell'Unità d'Italia.

Penso ad una nave che sul far del mattino, venendo da lontane terre, si avvia lungo il Canale di Sicilia per andar verso il Tirreno.

Penso all'anziano marinaio abituato a sostenere la fatica delle tempeste e mi pare di vederlo mentre addita al giovane mozzo le funi conduttrici dell'Elettrodoto di Messina che, contro le luci dell'alba, salgono dalla Calabria sul pilone di Torre Cavallo, si lanciano a superare leggere ed eleganti lo Stretto per risalire sul pilone di Punta Sottile e quindi scendere in Sicilia, dicendo al suo Allievo:

È la madre Italia che unisce i suoi figli.

A cui noi aggiungiamo, guardando avanti, nel futuro:

Possa, un giorno, un'unica fune valicando mari, correndo su pianure, superando catene di monti unire, soave e gentile, tutte le affaticate genti di buona volontà.

Italo Bertolini

BIBLIOGRAFIA

(1) BORNHARDT W., *Wilhelm August Julius Albert und die Erfindung der Eisendrahtseile*, Berlino, VDI-Verlag, 1934, p. 3.

(2) BORNHARDT W., *l.c.*, p. 19.

(3) BORNHARDT W., *l.c.*, p. 7.

(4) HOPPE O., *Alberts Versuche und Erfindungen*, in « Stahl und Eisen », 15 giugno e 1° luglio 1896.

(5) BORNHARDT W., *l.c.*, p. 24.

(6) VICAT, *Note sur l'allongement progressif du fil de fer soumis à diverses tensions*, in « Annales des Ponts et Chaussées », 1834, 1 sem., p. 40.

(7) LEINEKUGEL LE COCQ G., *Le pont de la Saône sur l'Isère*, in « Génie Civil », 1° ottobre 1954.

(8) BENOIT G., *Zum Gedächtnis an W. A. Julius Albert und die Erfindung seines Drahtseiles*, Berlino, VDI-Verlag, 1935, p. 28.

(9) BORNHARDT W., *l.c.*, p. 37.

(10) TIMOSHENKO S. P., *History of strength of materials*, Londra, McGraw-Hill, 1953, p. 162.

(11) GOUGH H. J. - MURPHY A. J., *The causes of failure of wrought-iron chain and cable*, in « Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers », aprile 1928, p. 293.

(12) WILKOV M. A., *New observations relating to the mechanism of fatigue failure*, in « Proc. ASTM », 1960, p. 556.

(13) TIMOSHENKO S. P., *l.c.*, p. 163.

(14) ARMENGAUD AÎNÉ, *Le Vignole des mécaniciens*, Parigi, Morel, 1863.

(15) *Enciclopedia delle Arti e Industrie*, Torino, UTET, vol. VI, P. III, p. 691.

(16) GRAF O., *Dauerversuche mit Nietverbindungen*, Berlino, Springer, 1935.

(17) GOUGH H. J. - COX H. L. - SOPWITH D. G., *Design of crane hooks and other components of lifting gear*, in « Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers », 1934, p. 253.

(18) LEIRIS H. de, *The fatigue testing of components. A means of revealing the danger point in pieces or structures*, in « Proceedings of the international conference on fatigue of metals 1956 », p. 118.

(19) SHIN OWADA, *Research on the mechanical properties of twisted wire ropes or cables*, in « Report of the Institute of industrial science », University of Tokyo, marzo 1955.

(20) PALMGREN A. - SUNDBERG K., *Spörsmaal rörande kullagrens belastningsförmåga*, in « Teknisk Tidskrift, Mekanik », 9.4.1919. - V. anche PALMGREN A., *Untersuchungen über die statische Tragfähigkeit von Kugellagern*, in « Die Kugellager Zeitschrift », 1930.

(21) WEIBULL W., *Ytspänningarna vid elastiska kroppars beröring*, in « Teknisk Tidskrift, Mekanik », 31.12.1919.

(22) KENNEDY N. G., *Fatigue of curved surfaces in contact under repeated load cycles*, in « Proceedings of the international conference on fatigue of metals », 1956, p. 282.

(23) FENNER A. J. - FIELD J. E., *A study of the onset of fatigue damage due to fretting*, Newcastle u.T., The North-East Coast Institution, 1960.

(24) USHER I. A. - SPROULE L., *Wire Rope Research at the Ontario Research Foundation*, in « Wire Rope in mines, Proceedings of a conference », 1950.

(25) WYSS T., *Stahldrahtseile der Transport- und Förderanlagen*, Zurigo, Schweizer Druck- und Verlagshaus, 1956.

(26) STARKEY W. L. - CRESS H. A., *An analysis of critical stresses and mode of failure of a wire rope*, in « Transactions of the ASME », Series B, novembre 1959.

(27) SHIN OWADA, *l.c.*

(28) TOSHIO AIDA - SUSUMU SATO, *Über die Beanspruchungen des Seildrahtes*, Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyoto, 1961.

(29) PÜNGEL W. - GEROLD S. - BEIDERMÜHLE A., *Einfluss der Dicke auf die Eigenschaften von Stahlseilen*, in « VDI-Zeitschrift », 7 agosto 1943, p. 493.

(30) GRAF O. - BRENNER E., *Versuche mit Drahtseilen für eine Hängebrücke*, in « Die Bautechnik », 5 settembre 1941, p. 410.

(31) KLINGENBERG W. - PLUM A., *Versuche an den Drähten und Seilen der neuen Rheinbrücke in Rodenkirchen bei Köln*, in « Der Stahlbau », dicembre 1955, p. 265.

(32) SIEVERS H. - GÖRTZ W., *Die Wiederaufbau der Strassenbrücke über den Rhein...*, in « Der Stahlbau », aprile 1956, p. 77.

(33) LIST F., *Versuche an Drahtseilen*, in « VDI-Zeitschrift », 31 dicembre 1932, p. 1297.

(34) BECK J., *Die Befestigung von Drahtseilen durch aufgezogene Stahlhülsen*, Dissertation T. H. Stuttgart, 1940.

(35) FORREST P. G., *Recent research on fatigue in metals*, in « The Chartered Mechanical Engineer », marzo 1961.

(36) BENOIT G., *Die Drahtseilfrage*, Karlsruhe u. Leipzig, F. Gutsch, 1915.

(37) AUTORE IGNOTO, *Il Novellino, ossia Le cento novelle antiche*, con introduzione e commento di Antonio Marenuzzo, Milano, Vallardi, 1906.

Sintesi delle ricerche sulla fatica delle funi flessibili nei diversi paesi

RENATO GIOVANNOZZI, ha fatto oggetto del tema indicato nel titolo sulla relazione generale del Colloquio Internazionale sulla fatica delle funi metalliche, svoltosi a Torino nel mese scorso, esaminando criticamente, attraverso la letteratura mondiale, i principali contributi al progresso degli studi sull'argomento. Successivamente ha fatto un'analisi illustrativa delle 16 memorie presentate sul tema nel Colloquio predetto.

Sono passati 127 anni, da quando, grazie alla genialità inventiva e costruttiva del tedesco W. A. J. Albert, furono realizzate le prime funi metalliche, che entrarono in servizio il 23 luglio 1834 nel pozzo Carolina, in Germania, presso Clausthal.

Nel secolo e un quarto che da allora è trascorso, questo organo meccanico ha acquistato sempre maggior diffusione ed importanza e, pur rimanendo inalterato nella sua struttura fondamentale (uno o più fili di acciaio avvolti ad elica) è stato variamente elaborato e migliorato, onde ricavarne, nelle varie applicazioni, a parità di costo, le massime prestazioni.

Questo difficile e lento, ma continuo, lavoro di perfezionamento è stato ed è possibile grazie alla tenacia e all'impegno dei ricercatori teorici e sperimentali di tutto il mondo, i quali, in varia misura e sotto vari punti di vista, si sono dedicati e si dedicano allo studio dei numerosissimi problemi connessi alla costruzione, all'impiego, alla resistenza statica e dinamica delle funi metalliche.

Questo studio è veramente assai complesso ed affascinante, perché investe moltissime branche della meccanica applicata nel senso più completo della parola, comportando la soluzione di problemi di geometria, (avvolgimenti, inclinazioni, passi, diametri, curvature, etc.); problemi di elasticità (sollecitazioni nell'avvolgimento dei fili, nell'avvolgimento su pulegge o tamburi, per trazione, per flessione principale e secondaria, per contatto locale, per torsione: rigidità di trazione, di flessione e di torsione); problemi di plasticità (sollecitazioni e deformazioni plastiche per schiacciamento locale, per rottura di trazione o flessione etc.), problemi di metallurgia e tecnologia (composizione e strut-

tura dell'acciaio, trattamenti termici e meccanici, struttura metallografica, caratteristiche di resistenza statica e a fatica del filo elementare, qualità e caratteristiche dell'anima tessile, qualità, caratteristiche ed effetto del lubrificante), ed infine, a coronamento e conclusione di tutti gli studi ricordati, lo studio del risultato finale di tanti studi, cioè delle caratteristiche di resistenza della fune nelle sue condizioni di impiego.

Queste condizioni, come ben noto, comportano sempre sollecitazioni di fatica, e di fatica a tempo, giacché la resistenza che interessa gli utilizzatori delle funi non si riferisce al tratto della curva di Wöhler parallelo all'asse delle ascisse, ma a quello inclinato su di esso.

La povera fune che, nuova, lucida e ben lubrificata, viene montata per la prima volta nel pozzo di estrazione, o nella funivia, o nell'ascensore di un palazzo, o in mille altri meccanismi ed impianti, è purtroppo fin da principio una condannata a morte, ad una scadenza più o meno lunga, che si misura, più che in tempo, in numero di cicli di affaticamento.

Ai tecnici il compito di mantenere in vita la condannata il più a lungo possibile, compatibilmente con le prestazioni richieste, di utilizzarla cinicamente fino all'ultimo, anche quando le rotture sempre più numerose dei fili e il progressivo scompaginamento della struttura mostreranno chiaramente che la fune è entrata nella fase dell'agonia finale.

Il controllo finale della bontà dei procedimenti di costruzione adottati, e della correttezza delle modalità di impiego di una fune metallica può pertanto essere effettuato solo attraverso una prova

di resistenza a fatica a termine, la quale, per una migliore e più chiara definizione delle condizioni di prova necessarie per ottenere la confrontabilità dei risultati, è opportuno venga svolta in laboratorio in condizioni controllate e costanti, mentre i risultati pratici di impiego, per la molteplicità e irregolarità dei fattori in giuoco, difficilmente possono da soli fornire indicazioni di carattere generale.

Tocca a me oggi il gradito onore di esporre agli illustri intervenuti una sintesi storica delle ricerche intorno alla fatica delle funi flessibili, e di inquadrare brevemente in essa i lavori presentati a questo Colloquio.

Desidero anzitutto assicurare che cercherò di mantenere la mia esposizione entro i limiti di un riassunto il più possibile sintetico, riguardante, più che i risultati finora ottenuti, i problemi studiati nei vari paesi, e da studiare, nella ricerca soprattutto sperimentale.

Parlo di ricerca sperimentale nei vari paesi piuttosto che di ricerche singole, perché, come è noto, le ricerche sperimentali sulla fatica delle funi sono così lunghe e costose che, di solito, gli sforzi delle varie nazioni si sono concentrati e si concentrano intorno a pochi Enti o Istituti universitari dotati delle macchine necessarie all'esecuzione delle prove, e dei mezzi finanziari e del personale occorrenti per farle funzionare ininterrottamente per anni ed anni.

Per questo motivo, soprattutto, ritengo inoltre opportuno limitarmi qui a far cenno dei gruppi di ricerche più importanti, senza preoccuparmi di volerle ricordare tutte, o quasi tutte, cosa che d'altronde mi sarebbe impossibile.

Penso che le prove di fatica

sulle funi possano dividersi in due categorie:

A) Le prove che si effettuano per ottenere risultati di carattere generale, per così dire assoluti. Tenuto conto del gran numero di variabili che influenzano la resistenza a fatica, e della dispersione caratteristica dei risultati delle prove di fatica, queste prove devono: 1) essere svolte tenendo accuratamente conto dei valori di tutte le variabili in giuoco; 2) essere ripetute parecchie volte, in modo da potere rilevare l'entità della dispersione dei risultati e ottenere delle medie attendibili; 3) essere, fin dove è possibile, sottoposte ad esame analitico, onde valutare ad es. l'ordine di grandezza delle varie sollecitazioni nelle diverse condizioni sperimentali.

B) Le prove che devono servire al confronto di varie funi destinate a funzionare in condizioni identiche o analoghe. In tali prove non si richiede una definizione così completa dei valori dei vari parametri, ma solo l'avvertenza di conservare costanti i parametri che si sa o si prevede possano avere influenza sulla resistenza della fune.

Nel primo tipo di prova ha grande importanza la definizione del modo col quale la fune viene affaticata nella macchina di prova, modo che deve sempre essere geometricamente e meccanicamente abbastanza semplice da consentire una valutazione, possibilmente analitica, delle varie influenze; nel secondo tipo, tale importanza è ovviamente minore, e possono anzi di proposito, come ha fatto l'Ing. Van de Moortel in una sua macchina, crearsi condizioni di sollecitazioni miste e complesse secondo uno schema convenzionale, che si ritiene più atto a rappresentare le condizioni reali di esercizio della fune.

L'interesse maggiore, dal punto di vista scientifico, è però naturalmente quello delle ricerche del primo tipo, le quali finora sono state svolte sistematicamente, per quanto mi consta, solo in tre nazioni, e precisamente in Inghilterra, in Germania e in Russia, men-

tre sono nella fase iniziale di svolgimento in Belgio e in Italia.

In Inghilterra e in Germania le ricerche sistematiche suddette sono state svolte quasi contemporaneamente, cioè soprattutto nel periodo compreso fra la prima e la seconda guerra mondiale; le ricerche russe hanno avuto inizio nel 1935, quando le altre erano terminate o volgevano al termine.

Una menzione particolare riguardano le indagini sistematiche compiute presso il Politecnico di Zurigo, raccolte nel pregevolissimo volume « Stahldrahtseile » del Prof. Wyss del 1957. Non si tratta di prove di fatica su funi in opportune macchine di prova, ma di un tentativo di inquadrare il problema della fatica delle funi entro le leggi normali della resistenza a fatica, mediante uno studio approfondito sia della resistenza del filo elementare, sia delle sollecitazioni unitarie cui il filo è sottoposto. In particolare vengono messe in conto e calcolate con buona approssimazione le sollecitazioni di contatto di tipo Hertziano (di cui già Thucker e Dachau avevano sottolineato la grande importanza), e quelle dovute alla flessione secondaria, cioè alla flessione del filo elementare appoggiato su quelli degli strati o trefoli adiacenti e caricato dalle azioni radiali trasmesse dai fili adiacenti. Tali sollecitazioni risultano di entità tale da alterare i rapporti corrispondenti alla considerazione delle sole sollecitazioni di trazione e di flessione calcolate nel modo tradizionale.

L'applicazione numerica ad un certo numero di casi concreti della pratica conferma l'attendibilità dei calcoli svolti, i quali pertanto segnano, a mio avviso, un vero sostanziale e razionale progresso per quanto riguarda il calcolo delle sollecitazioni delle funi, per tanto tempo ancorato alle vecchie discussioni sulla formula di Reuleaux o a poco più.

Le ricerche sistematiche inglesi si sono svolte nel periodo 1920-1935 sotto la direzione di un Wire Ropes Research Committee di cui è stato costantemente relatore il Dott. A. Scoble, e sono riassunte in cinque Reports di tale Commis-

sione aventi le date: Ottobre 1920, Dicembre 1924, Aprile 1928, Maggio 1930 e Novembre 1935.

Nel primo Report veniva presentata una bibliografia completa (88 lavori) di quanto pubblicato fino allora sull'argomento, a partire all'incirca dall'anno 1890, e un riassunto delle conclusioni dei lavori stessi.

Il Dott. Scoble concludeva che « La quantità di informazioni attendibili è deludente, se la si considera in relazione al numero di lavori scritti sull'argomento. Vi sono inoltre ripetizioni inutili, molti preconcetti e, quando le conclusioni dipendono dall'esperienza pratica, esse sono spesso indefinite, e di solito non tengono conto di qualcuna delle variabili. Vi sono pochissimi dati sperimentali disponibili e questo ha probabilmente ostacolato i teorici per mancanza di dati sui quali lavorare ».

Negli anni 1919-1924 il Comi-



Fig. 1 - Schema della macchina dello « Wire Ropes Research Committee ».

tato svolse numerose ricerche sperimentali consistenti in prove di flessione alternate in una macchina secondo lo schema di fig. 1, sostanzialmente identico a quello della macchina costruita anni prima dal Prof. Benoit nella Technische Hochschule di Karlsruhe (fig. 2).

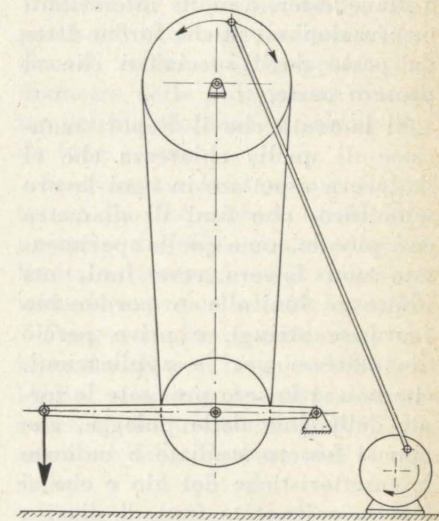


Fig. 2 - Schema della macchina di Benoit.

Furono sperimentate funi con fili non rivestiti ed aventi carico di rottura di $110 \div 130 \text{ kg/mm}^2$, e diametri di 0,53 mm o di 0,91 mm. Le funi avevano tutte un diametro di circa 8 mm. Furono eseguite prove su fili isolati, sui trefoli e sulle funi, per durate fino a circa un milione di cicli (retta-arco di cerchio-retta). Le prove su fune completa furono un po' meno di 100.

I risultati, nella interpretazione datane dal Dott. Scoble, indicavano una moderata superiorità dell'avvolgimento parallelo su quello crociato con puleggia con gola di forma corretta (correctly grooved), una migliore resistenza delle funi formate dai fili di maggior diametro con pulegge di diametro corrispondentemente maggiore, la superiorità dell'anima tessile su quella metallica, il prodursi della rottura per tensioni nominali (trazione più flessione, calcolata con la formula di Reuleaux), alquanto inferiori al limite di snervamento, l'indipendenza del lavoro interno di attrito dalla resistenza a fatica, l'importanza delle sollecitazioni alternate di flessione, rilevata dall'aspetto di molte rotture dei fili.

Venivano inoltre esposti due risultati non troppo convincenti e cioè: durata dei fili isolati crescente al crescere della tensione di trazione; maggior durata della fune in assenza di lubrificazione.

Questo secondo Report fu discusso in due sedute: a Londra e a Manchester, e molte interessanti osservazioni e critiche furono fatte da parte degli specialisti che vi presero parte.

Si lamentò che il Report mancasse di quella chiarezza che ci si doveva aspettare in ogni lavoro scientifico, che funi di diametro così piccolo come quelle sperimentate non fossero vere funi, ma piuttosto funicelle o cordoncino (cord or string), e prive perciò di interesse per le applicazioni, che non si fossero precisate le forme delle gole delle pulegge, che non si fossero studiate e indicate le caratteristiche del filo e che si fossero sollecitate funi di diversa resistenza unitaria con uguale ca-

rico, anziché con uguali frazioni del rispettivo carico di rottura.

Dei due strani risultati prima indicati si tentò di dare varie spiegazioni, anch'esse poco convincenti, senza indicare però quella vera (slittamento della puleggia sul filo o sulla fune).

Fra l'altro Mr. E. Arthur Rankins nel suo intervento espresse la propria meraviglia per i pretesi benefici della mancanza di lubrificazione e riferì di avere osservato, in un filo di una fune male lubrificata, la formazione, prodotta dal calore di attrito, di uno strato superficiale di martensite, dal quale facilmente avrebbe poi potuto partire la rottura per fatica.

Nei quattro anni successivi furono eseguite nuove prove su 8 funi, che differivano da quelle già sperimentate per la maggiore resistenza unitaria dei fili di acciaio, la quale raggiungeva adesso i $170 \div 180 \text{ kg/mm}^2$.

I diametri dei fili e delle funi erano ancora di 0,53 o 0,91 mm, e di 8 mm rispettivamente.

Furono sperimentate anche funi di piccolo diametro trulay, cioè con fili preformati. Le prove furono protratte fino ad una durata massima di mezzo milione di cicli anziché di un milione, con flessioni di senso concorde ed anche di senso alterno, queste ultime su una macchina Vaughan-Epton rispondente allo schema di (fig. 3).

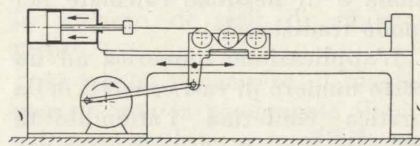


Fig. 3 - Schema della macchina di Vaughan-Epton.

Furono inoltre eseguite prove di fatica su fili sottoposti a sollecitazioni composte statiche (tensione con torsione e con compressione laterale) e dinamiche (tensione e flessione su pulegge, con o senza torsione costante).

I risultati principali, sorvolando sul confronto minuto delle durate ottenute con le varie funi sperimentate, furono i seguenti:

— Quando le flessioni erano di senso alterno, il carico sopportato era circa $\frac{3}{4}$ di quello sopportato con flessioni dello stesso senso, e viceversa, a parità di carico, il numero di flessioni sopportate veniva circa dimezzato.

Nelle prove di fatica su fili risultò che una deformazione torsionale permanente anche notevole influiva molto poco sulla resistenza a fatica, a flessione e trazione, mentre una coppia torcente applicata, anche modesta, contribuiva ad abbassarla sensibilmente.

Come sollecitazione base delle funi, da confrontare con la resistenza a fatica del materiale, si assumeva la somma della sollecitazione di tensione con quella di flessione calcolata con la formula di Reuleaux.

Anche questo terzo Report fu vivacemente discusso in due sedi, a Londra e a Manchester.

Successivamente furono svolte, nel periodo 1924-1930, e riferite nel 4° Report del Comitato, altre prove su funi del diametro di 16 mm circa, cioè doppio di quello delle funi fino allora sperimentate, in una nuova macchina di prova sostanzialmente identica a quella fino allora usata, e che ne differiva solo per le maggiori dimensioni.

Le funi sperimentate furono 4, aventi carico di rottura statico quali uguale, 3 con avvolgimento crociato normale, 1 con avvolgimento crociato trulay. Ogni fune fu sperimentata con 4 diametri di puleggia pari da 19 a 57 volte circa quello delle funi, e con diverse (3 o 4) tensioni di trazione per ogni diametro di puleggia.

Le misure eseguite e riportate furono complessivamente 43.

Da esse risultò anzitutto la netta superiorità della fune trulay sulle altre. Inoltre, confrontando due funi, diametro 16 mm, con due rispettivamente analoghe, diametro 8 mm, a parità di rapporto fra carico applicato e carico di rottura e fra diametro puleggia e diametro fune, risultò che le funi più grandi avevano una durata sensibilmente minore. Da ciò il Dott. Scoble dedusse l'esistenza di un effetto di scala, per cui,

coeteris paribus, le funi di maggior diametro resistono meno.

In realtà, come fu osservato, non esisteva nelle funi confrontate una completa similitudine (i diametri dei fili non erano nel rapporto di quelli delle funi), per cui la conclusione sembrò piuttosto affrettata.

Una prova molto interessante fu eseguita per accertare l'effetto della velocità di piegamento sulla durata, secondo lo schema della (fig. 4).

La puleggia P era fissa, e la fune veniva alternativamente portata dalla posizione S alla D e viceversa. In questo modo veniva eliminato l'effetto dell'inerzia delle parti mobili, che, in una macchina di prova normale, va a scaricarsi, almeno in parte, sulla fune stessa da sperimentare.

Il risultato fu un leggero aumento di durata (da 470.000 a 606.000 cicli) al crescere della velocità di prova (da 60 a 214 cicli l'). Questo risultato, contrario alla comune opinione di allora e forse anche di oggi, è da considerare, a mio avviso, interessante e valido.

Venne inoltre studiato, per una delle funi, sottoposta ad una trazione costante, l'effetto dell'angolo L di avvolgimento sulla puleggia, ottenendo un aumento fortissimo di durata al diminuire di L sotto i 20° circa, e una quasi costanza della durata dai 20° agli 80° . Essendo costante la corsa della fune, variava, al variare di L, la lunghezza del tratto di fune che veniva affaticato doppiamente, per ogni giro della puleggia motrice, passando da prima a dopo l'arco di contatto e viceversa.

D'altra parte, ciò che può avere realmente influenza sulla durata non è tanto l'angolo di avvolgimento, quanto il rapporto fra la lunghezza del tratto di fune affaticata in un certo modo (lunghezza dipendente e dall'arco di avvolgimento e dalla corsa) e il passo della fune.

Perciò la prova e il risultato non costituiscono, a mio avviso, un buon esempio di razionalità, sia nell'esecuzione della prova, sia nella presentazione del risultato,

la quale tende ad insinuare l'esistenza di una relazione concettuale fra due grandezze indipendenti o quasi.

Si cercò anche di presentare i risultati nella forma di un diagramma di Goodman, assumendo come tensione media quella di trazione, e come ampiezza della oscillazione di tensione la sollecitazione di flessione calcolata secondo la formula di Reuleaux, confrontando le tensioni così calcolate con quelle di un presunto diagramma di Goodman del filo isolato. Con questo modo di procedere, risultava che, al diminuire del diametro della puleggia, restando costante quello del filo, si potevano raggiungere nella fune a parità di durata limiti di tensione nominale più elevati.

In un'appendice veniva riportato il riassunto delle prove eseguite da Woernle nell'anno 1928-1929 su funi di 16 mm di diametro. Riguardo ad esse il Dott. Scoble avvertiva che: «La maggior parte dei risultati dovrebbero essere accolti con cautela, perchè le prove furono fatte in condizioni molto severe e i campioni di fune cedevano rapidamente. Questo modo di procedere accelerava la prova, ma non rappresentava le condizioni di lavoro.

Per il confronto di funi con avvolgimento parallelo e crociato il massimo numero di piegature registrato era circa 120.000 per una fune, 60.000 per un'altra, mentre molte erano nella regione delle 20.000 ».

Il quinquennio 1930-35 fu l'ultimo periodo di attività del Comitato, che pubblicò nel 1935 il suo quinto ed ultimo Report.

In esso si riferiva su nuove prove di flessione eseguite su funi simili, ma di diverse dimensioni, per confermare l'esistenza di un effetto di scala. Furono provate alcune piccole funi su pulegge di raggio proporzionalmente molto piccolo, concludendo che in tali casi estremi è effettivamente conveniente usare funi aventi, a parità di resistenza a trazione, un numero maggiore di fili di piccolo diametro.

Furono eseguite esperienze con

funi dalle quali, mediante bagno prolungato in solvente, era stato asportato tutto, o quasi tutto, il lubrificante, ed insistendo nell'affermare che conviene che una fune non sia lubrificata, o che sia lubrificata molto leggermente, come accade dopo una immersione prolungata in un solvente. Il lubrificante abbondante avrebbe, secondo il Dott. Scoble, facilitato il trasporto di particelle derivanti da abrasione e quindi l'usura della fune.

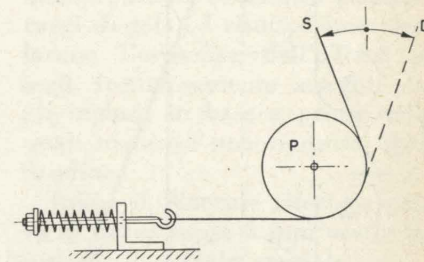


Fig. 4 - Misura dell'effetto della velocità (Wire Ropes Research Committee).

Furono anche eseguite le solite prove di flessione su 3 funi del diametro di circa 16 mm con trefoli piatti, prove con pulegge leggere e pesanti per accertare se si aveva o no un effetto di slittamento dannoso per la vita della fune, concludendo che questo effetto nelle condizioni delle esperienze non si manifestava, e si cercò di porre ancora una volta in relazione la durata con la somma della sollecitazione di trazione e di quella nominale di flessione, con risultati poco chiari.

Anche la relazione fra il rapporto del carico di trazione al carico di rottura e il rapporto del diametro della puleggia al diametro del filo risultava variabilissima da fune a fune.

Sperimentando funi uguali in tutto, fuorchè per la resistenza unitaria del filo, si riscontrò il limitato vantaggio di resistenze unitarie superiori ai 140 kg/mm^2 .

Furono inoltre sperimentati vari materiali per la gola della puleggia, riscontrando naturalmente aumenti di durata crescenti al diminuire della durezza del materiale.

Furono anche rilevati cicli di isteresi in condizioni di flessione

statica ed eseguite altre prove su cui per brevità si sorvola.

Il Report contiene una bibliografia di 139 lavori relativi al periodo 1918-1934 e un tentativo di conclusione generale che lasciava aperte molte questioni e suscitava molti dubbi.

Dovendo esprimere un giudizio complessivo sul lavoro svolto dallo Wire Ropes Research Committee

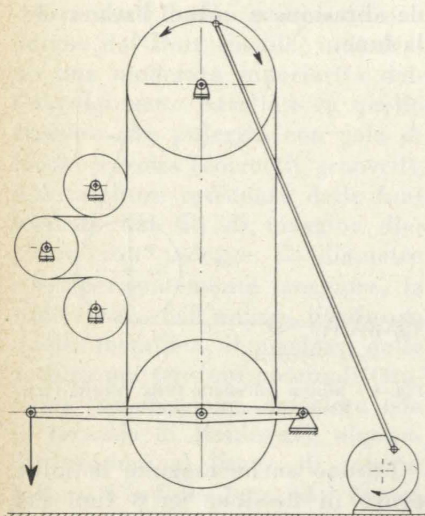


Fig. 5 - Schema della macchina di Woernle.

nei 15 anni della sua attività, dovrei dire che, pur apprezzando altamente il fatto che per la prima volta ci si sia proposto uno studio sperimentale sistematico del problema della durata delle funi, ritengo che la condotta generale delle esperienze sia criticabile sotto molti aspetti, sia come programmazione, sia come esecuzione, sia come interpretazione. Basti pensare, tra l'altro che, malgrado ripetute critiche in sede di discussione dei vari Reports, non furono mai precisati i raggi di gola delle pulegge, che si continuò a sostenere contro ogni buon senso e contro ogni indicazione della pratica, il vantaggio della mancanza di lubrificazione, che si insistette nella pretesa di porre in relazione la resistenza a fatica coi soli valori delle tensioni nominali (trazione + flessione secondo Reuleaux), che il numero di prove eseguite fu, tenuto conto dei 15 anni impiegati, alquanto limitato, e che molte volte non si operò in modo da porre chiaramente in luce l'effetto di una sola

variabile, ottenendo risultati dispersi, poco chiari, difficilmente interpretabili.

Ricordo che nel 1930, dopo la pubblicazione del terzo Report inglese, il Woernle scriveva fra l'altro: « Il Dott. Scoble riconosce, nella conclusione del suo terzo Report, che i risultati da lui trovati con funicelle in miniatura (Modellseilchen) non consentono alcuna chiara conclusione, mentre sottolinea il fatto che dovrebbero eseguirsi ricerche con funi di maggior dimensioni (egli parla di funi da 16 a 32 mm di diametro). I risultati delle ricerche con le funicelle in miniatura furono spesso contraddittori. ...Inverosimile è anche il risultato che una lubrificazione abbondante non aumenti, ma abbassi la durata della fune... Le curve del progredire delle rotture ottenute dal Dott. Scoble (numero di rotture di fili in funzione del numero di piegature) non consentono alcuna conclusione sul buon comportamento delle funi a causa della mancanza di un programma nell'esecuzione delle prove. Egli stesso dice che dalle sue curve non si può trarre alcuna conclusione... ».

Come si vede il Woernle aveva tenuto a ripagare in abbondanza il commento non troppo elogiativo del Dr. Scoble intorno ai suoi lavori, per cui si deve constatare che, malgrado tutte le funi che li univano, i due ricercatori non si sentivano troppo legati fra di loro.

In effetti, a mio avviso, di ben altra incisività, rigore ed efficacia, fu lo studio eseguito in Germania negli anni 1929-1934 per opera soprattutto del Woernle e di un gruppo di studiosi, fra i quali è doveroso ricordare i nomi del Prof. Benoit, il maestro di Woernle, di Herbst e di Klein.

Il Woernle, a quanto ho rilevato dai suoi lavori, aveva studiato a Karlsruhe, sotto la guida, penso, del Prof. Benoit, e vi aveva conseguito nel 1913 la Habilitation con uno studio sulle funi dal titolo: « Zur Beurteilung der Drahtseilschwebbahnen für Personenbeförderung ». Nel 1914 aveva pubblicato un lavoro sul calcolo delle funi: « Ein Beitrag zur Beur-

teilung der heutigen Berechnungsweise der Drahtseile ».

Chiamato, nell'Aprile 1927, dalla Technische Hochschule di Danzica alla Technische Hochschule di Stoccarda, ottenne che vi fosse istituito un Istituto di « Fördertechnik », nel quale dette inizio con febbrile attività ad una serie di ricerche sistematiche sulle funi, che restano ancor oggi, a mio avviso, un modello del genere.

Egli costruì anzitutto tre macchine di prove alternative, secondo lo schema della fig. 5, e cioè simili a quelle di Benoit, con la sola differenza di un rinvio della fune sopra tre pulegge di diametro più piccolo di quelle, uguali, motrice e tenditrice.

In questo modo si potevano, regolando l'ampiezza di oscillazione della puleggia motrice, far compiere cicli con flessione di ugual senso, o di senso opposto, sopra un tratto abbastanza lungo di fune. La frequenza era di 44 oscillazioni al primo. Il carico applicabile era di 5.000 kg, e potevano essere provate funi fino a 26 mm di diametro.

Con questa macchina, lavorando giorno e notte, (Tag-und Nachtarbeit) il Woernle sperimentò in un solo anno ben 37 tipi di funi, studiando l'effetto sulla durata della fune 1) del raggio di gola della puleggia; 2) del tipo di avvolgimento; 3) della tensione unitaria di trazione; 4) del rapporto diametro puleggia/diametro filo elementare (giungendo, come gli inglesi, a risultati diversi da fune a fune); 5) della resistenza unitaria dei fili, concludendo, come gli inglesi, sullo scarso vantaggio di aumentarla oltre i 130 ÷ 140 kg/mm²; e studiando inoltre: la riduzione del carico globale di rottura col numero di cicli di affaticamento per varie tensioni unitarie di trazione; 7) la relazione, circa lineare, fra il numero di fili rotti e la riduzione del carico di rottura statico della fune; 8) l'effetto della zincatura, rivelatasi decisamente benefica; 9) l'effetto dell'avvolgimento trulay, rivelatosi superiore agli altri, specialmente per funi con fili di piccolo diametro; 10) l'effetto delle flessioni di senso opposto in confronto a quelle di un solo senso, che avrebbe, in al-

cune poche prove, ridotto la durata del 25 % circa.

Le prove ricordate erano svolte per durate comprese all'incirca fra le 20 e le 100-150 mila piegature, alquanto minori per tanto, in media, delle durate raggiunte dagli inglesi.

La relativa brevità delle prove, corrispondente ad una maggiore severità di sollecitazione, era però, a mio avviso, non dannosa, ma benefica, perchè consentiva di porre in luce in modo più chiaro e netto l'effetto delle diverse variabili.

Le ricerche tedesche continuarono con ininterrotta intensità negli anni successivi. Fu istituito uno speciale Comitato per le ricerche sulle funi del V.D.I. — Verein Deutscher Ingenieure, presieduto dal Woernle, il quale pubblicò man mano le relazioni delle ricerche proprie ed altrui.

L'ultima relazione di cui ho potuto prendere visione è quella del 1934, relativa alla 10^a riunione del Comitato stesso.

Non è certo possibile riferire in particolare su tutte le ricerche svolte in quegli anni. Mi limiterò pertanto a ricordare solo gli argomenti principali.

Nel 1930 il Woernle studiò l'effetto della mancanza di lubrificazione, trovando, come naturale, che essa era sempre dannosa; l'effetto vantaggioso degli avvolgimenti a contatto lineare (ugual passo) in confronto a quelli a contatto puntiforme (uguale inclinazione), l'effetto di diversi materiali usati per le pulegge, ottenendo durate più alte con materiali meno duri; i coefficienti di cordatura di funi con regolare inclinazione dei fili e con ugual passo, ottenendo in ambedue i casi valori poco diversi; il modo di procedere della rottura negli avvolgimenti di vario tipo, ritardato fino alla fase finale della rottura nell'avvolgimento parallelo, più distribuito durante il periodo di affaticamento in quello crociato.

Nel 1930-31 furono eseguite dall'Ing. H. Herbst, direttore della Stazione per lo studio delle funi (Seilprüfstelle) della Westfälische Berggewerkschaftskasse, in Bochum, prove di confronto a fles-

sione su funi del diametro di 26 mm con avvolgimento parallelo e crociato normale, Seale e Warrington, su puleggia del diametro di 1,5 m.

Risultò confermata in ogni caso la superiorità dell'avvolgimento parallelo su quello crociato, e della formazione Seale.

Furono inoltre eseguite prove di flessione facendo rotare lentamente la fune intorno al proprio asse, (90° ogni 20.000 flessioni circa), in modo che tutti i fili esterni venissero successivamente in contatto con la gola delle pulegge. Ne risultò un aumento notevole del numero delle rotture dei fili, ma insieme una durata a rottura circa tripla. Mentre la rottura finale era avvenuta sotto un carico di trazione di 6,77 t, in certi tratti di fune la prova di rottura statica, eseguita dopo la rottura per fatica, dette un carico di rottura più che triplo, di circa 21 t, pur essendo uniformemente distribuite le rotture dei fili esterni.

Herbst attribuiva questo fatto a un maggior attrito statico nella prova di trazione in confronto a quello che si ha nella prova di flessione, per cui i fili rotti tornerrebbero, nella prova di trazione, a collaborare alla resistenza della fune a una distanza dalla rottura minore che nella prova di flessione.

Il Woernle riferì su prove di flessione con cinque diversi lubrificanti e su prove eseguite per determinare quando una fune debba essere posta fuori servizio; determinando la resistenza residua a trazione dopo che, nella prova di flessione, si erano prodotte, in un pezzo di fune, rotture di fili in numero pari ad una certa percentuale del numero totale dei fili. Egli ottenne una diminuzione di resistenza a trazione residua circa lineare in funzione della percentuale suddetta, fino a un valore di tale percentuale crescente col numero di fili totale della fune e più piccola per le funi ad avvolgimento parallelo che per quelle ad avvolgimento crociato. Oltre tali percentuali la resistenza residua a trazione crollava bruscamente.

Il Woernle concludeva che la

resistenza a trazione non può costituire un fattore attendibile per giudicare sulla capacità di resistenza a fatica, e che ogni tipo di fune ha una percentuale critica di fili rotti, oltre la quale è immediata la rottura.

Egli riferì inoltre su prove di durata eseguite su 6 funi di ugual materiale, di tre diversi diametri (13, 16 e 19), ma perfettamente simili dal punto di vista geometrico, (diametro fune, diametro fili, inclinazione, passo) su pulegge anch'esse geometricamente simili, (diametro pulegge, raggi di gola). I risultati non rivelarono l'esistenza dell'effetto di scala frettolosamente asserito dagli inglesi, in base a prove nelle quali mancava una rigorosa similitudine.

Infine il Woernle riferì su prove di fatica sopra 3 funi costituite con fili in acciaio speciale.

Nella riunione del Gennaio 1932, oltre a comunicazioni di argomenti che non rientrano nel tema I di questo Congresso (controllo elettromagnetico della fune, di H. Herbst, confronto di due diversi tipi di fune per cucchiaini di escavatrici in base all'osservazione dei risultati pratici), furono presentati i risultati di tre ricerche del Woernle molto interessanti.

Nella prima furono eseguite prove di fatica su funi identiche in tutto fuorchè nella resistenza unitaria dei fili, (80, 130, 160, 180, 200 kg/mm²), e sui fili stessi, ponendo a confronto la durata dei fili e la durata delle funi con essi costruite, a parità, nei fili e nella fune, di sollecitazione unitaria di trazione (30 kg/mm²) e di diametro di puleggia.

Le curve delle durate per i fili e per le funi risultarono di andamento del tutto analogo, confermando che un aumento di resistenza unitaria oltre i 130 kg/mm² fino ai 180 kg/mm² produce un vantaggio alquanto limitato, mentre oltre i 180 kg/mm² si ha addirittura una certa diminuzione di durata.

Furono inoltre eseguite prove di flessione di fili da 130 a 180 kg/mm² su pulegge di vario diametro con due diversi valori del-

la tensione unitaria: (10 e 30 kg/mm²); ottenendo per il filo da 180 kg/mm² durate sensibilmente maggiori che per quello da 130 kg/mm² (nelle funi, come si è detto, il vantaggio era assai minore). Risultò inoltre, come naturale, che la durata diminuiva al crescere della tensione del filo, contrariamente a quanto trovato dagli inglesi, a causa, secondo ogni verisimiglianza, dello slittamento fra filo e puleggia.

Un'altra ricerca di Woernle del 1931 molto nota e importante è quella sull'effetto di un carico trasversale, quale si ha nelle funi portanti. Facendo variare, a parità di carico trasversale, la trazione della fune, cioè la sua sollecitazione unitaria, il Woernle ottenne, per ogni carico trasversale, una curva di durata avente un minimo, il quale separava il ramo corrispondente al caso della fune avvolta su puleggia, e che ne assumeva la curvatura e il ramo corrispondente al caso della fune portante, che assume, come è noto, una curvatura indipendente dal raggio della puleggia.

La durata cresce nel primo ramo al diminuire della sollecitazione di trazione, nel secondo ramo al crescere di essa, per cui risulta che, per avere una forte durata, la trazione deve essere

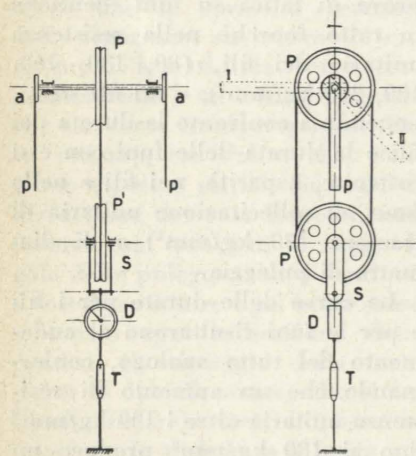


Fig. 6.

bassa nelle funi lavoranti su puleggia, elevata nelle funi portanti.

Nuovi interessantissimi contributi furono apportati anche nella riunione del 1933. Ricordo il confronto del Woernle fra l'effetto

delle gole di puleggia rotonde (maggior durata dell'avvolgimento parallelo, già osservata in precedenti ricerche) e quello delle gole a V, con incastro della fune (maggior durata dell'avvolgimento crociato), le prove di H. Herbst, a flessione su pulegge del diametro di 1 m, di funi del diametro di 23 mm, con avvolgimento crociato e filo nudo o variamente zincato, con avvolgimento parallelo, e diversi sensi di avvolgimento nei vari strati dei trefoli.

Con senso di avvolgimento discorde dei trefoli, gran parte delle rotture si producevano nei fili interni. Fu anche sperimentato l'effetto di vari tipi di puleggia per pozzi di miniera.

Dai risultati lo Herbst deduceva l'opportunità di numeri dei fili nei trefoli uguali o minori di 37.

L'ultima seduta del Comitato della VDI su cui qui riferisco, è quella del 1934, dedicata alla celebrazione del centenario dell'invenzione della fune.

Il Woernle riassunse precedenti ricerche sull'effetto della forma della gola e parlò della relazione che, secondo sue vecchie ricerche, esisterebbe, salvo eccezioni, fra la durata della fune e la sua rigidità anelastica, nel senso che una maggiore rigidità anelastica corrisponderebbe ad una minore durata e viceversa.

Nelle funi zincate, la rigidità anelastica è maggiore che in quelle con fili nudi, ma in questo caso la durata non risulta diminuita.

Riguardo alla rigidità anelastica delle funi, cito un sistema molto semplice per la sua misura da me ideato nel 1940 e usato con risultati veramente ottimi.

La fune (fig. 6) era avvolta sopra due pulegge; alla inferiore era applicato il carico, alla superiore un pendolo che si faceva partire dalla posizione orizzontale e di cui si registrava la posizione di arrivo, come nella macchina di Charpy per la misura della resistenza.

Dedotta la piccola perdita di attrito dei cuscinetti, da misurare una volta per tutte o quasi, dalla perdita di quota del baricentro del

pendolo si risale alla perdita nella fune per rigidità anelastica.

Nella (fig. 7) sono riportati i risultati di alcune misure del genere (in ascisse vi è la trazione T,

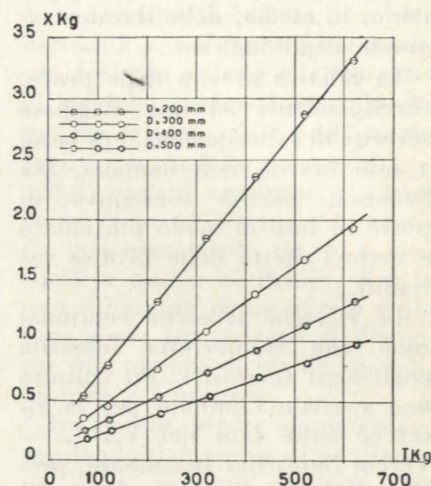


Fig. 7.

kg, della fune; in ordinate la forza periferica X, kg, corrispondente alla perdita per rigidità anelastica. A parità di diametro D della puleggia, l'allineamento dei punti di misura è così perfetto da destare dei sospetti, ma desidero precisare che sarebbero sospetti del tutto infondati. Con quella macchina compii personalmente alcune migliaia di misure e sempre ottenni perfetta linearità fra carico e rigidità.

Seguendo questo procedimento di prova, una misura del genere potrebbe essere effettuata molto semplicemente, durante l'affaticamento della fune, e forse, con opportuni adattamenti, senza nemmeno togliere la fune dalla macchina di prova.

Oltre alla relazione del Woernle, ve ne fu, fra le altre, una di H. Herbst su prove a fatica di funi per miniera del diametro di 31 ÷ 33 mm con fili di 1,3 ÷ 2 mm di diametro, sopra pulegge di 1-1,25-1,50 m di diametro.

Le durate risultarono, entro certi limiti, proporzionali alla potenza 2,4 ÷ 3 del rapporto: diametro puleggia/diametro filo.

A mio avviso, l'opera del Comitato Tedesco per lo studio delle funi, svolta essenzialmente nel quinquennio 1929-1934, è da ritenere di molto superiore a quella

svolta, in un periodo di tempo triplo, dalla Commissione Inglese, sia per il numero, la varietà degli argomenti trattati, sia per i criteri di chiarezza sperimentale seguiti, sia per le numerose conclusioni ottenute, poste man mano in luce con chiarezza e senso pratico.

Gran parte del merito di tutto ciò va indubbiamente al Woernle ma sarebbe stato ingiusto non ricordare tanti altri illustri ricercatori, in particolare l'Ing. H. Herbst, allora direttore della Seilprüfstelle della Westfälische Berggewerkschaftskasse di Bochum.

Colgo qui l'occasione per ricordare come in Bochum sia stato solo un anno fa costruito dalla Westfälische Berggewerkschaftskasse un nuovo grandioso edificio destinato esclusivamente alla prova delle funi, dotato, fra l'altro, di una macchina a trazione recentissima che consente di raggiungere 1000 t di carico statico, e 250 t in prove a carico pulsante, e di una macchina per flessione alternata che consente la prova di funi fino a 30 mm di diametro.

Desidero ringraziare il Direttore del Centro, Ing. K. Düwell, che mi ha gentilmente fornito molte interessanti indicazioni sulle più recenti attività del Centro stesso, e che non è purtroppo fra noi, perchè trattenuto da altri impegni in Sud Africa.

Se un appunto, a mio avviso, può farsi all'opera dell'Ausschuss für Drahtseilforschung, è quello di avere sostanzialmente, come gli inglesi, e come ancora più recentemente i russi, rinunciato a priori ad una interpretazione teorica del fenomeno della fatica delle funi più approfondita di quanto non possa farsi con la sola formula di Reuleaux o simili.

Il fallimento, più volte riscontrato, del tentativo di porre in relazione la durata di una fune con le tensioni nominali di trazione e flessione, avrebbe dovuto spingere ad una analisi più approfondita delle sollecitazioni unitarie del filo nei vari tipi di avvolgimenti e formazioni, come è poi stato fatto magistralmente dalla scuola svizzera del Prof. Wyss.

Comunque, dal punto di vista sperimentale, le ricerche compiute

te furono, a mio avviso, veramente esemplari.

Da pochi anni, grazie alla traduzione tedesca del volume di Shitkow e Pospechow, abbiamo appreso come il problema della costruzione e resistenza delle funi sia stato oggetto in Russia fin dal 1935 di ricerche varie di notevolissima ampiezza.

L'introduzione del volume, coi molteplici riferimenti ai Congressi del Partito Comunista, ai piani quinquennali, alla fabbrica « Falce e Martello » decorata dell'ordine di Lenin e dell'ordine della Bandiera Rossa, farebbe pensare che anche le ricerche sulle funi fossero state fatte da un punto di vista politico, più che scientifico, ma, per fortuna, dopo gli accenni iniziali, non si parla più di politica, ma solo di ricerche sulle funi.

È interessante notare che nella bibliografia finale del volume, di 72 lavori, non sono citati né i lavori inglesi, né i lavori tedeschi, benchè gli schemi delle macchine di prova costruite dai russi siano evidentemente ispirati a quelli delle macchine tedesche.

Non è naturalmente possibile dar qui che un cenno degli argomenti e dei risultati esposti nel volume, che è diviso in tre parti principali, le quali trattano rispettivamente delle ricerche sperimentali, delle relazioni analitiche per la determinazione delle grandezze geometriche delle funi, e delle conclusioni dei due studi precedenti, come pure dei principali problemi, al cui studio, secondo gli autori, dovranno indirizzarsi le ulteriori ricerche.

Le conclusioni delle ricerche sperimentali sono basate su circa 1000 prove di fatica, eseguite su 76 diversi tipi di funi, sollecitate con tensioni di trazione da 14 kg/mm² in su, fino ad ottenere durate minime di 80.000-120.000 piegature, nonchè su prove tecnologiche varie di cui si darà un rapido cenno.

I russi hanno ripetuto, naturalmente in modo non identico, quasi tutte le ricerche sull'influenza delle varie grandezze sopra la durata delle funi già eseguite dagli inglesi e dai tedeschi, ma ne han-

no eseguite anche alcune veramente nuove, che qui rapidamente ricordo.

Anzitutto essi hanno eseguito uno studio molto accurato della tecnologia di costruzione del filo metallico, cominciando dalla fusione dell'acciaio e arrivando alla trafilatura, al patentamento, ai trattamenti termici. Hanno studiato, ad esempio, l'effetto della zona del lingotto da cui veniva prelevato l'acciaio, l'effetto della percentuale di carbonio, l'effetto dei diversi possibili rapporti di riduzione nelle successive trafilature occorrenti per raggiungere la dimensione finale del filo, l'effetto delle varie caratteristiche meccaniche del filo (resistenza a trazione, disuniformità di resistenza a trazione dei fili di vari strati in una fune, resistenza e flessione e a torsione secondo le modalità normali di prova dei fili), la disuniformità di caratteristiche del filo su una matassa lunga 1250 metri, l'effetto della deformazione prodotta dall'avvolgimento dei fili nel trefolo e dei trefoli nella fune, l'effetto della preformazione dei fili e dei trefoli, l'effetto delle tensioni residue prodotte nel filo dalla trafilatura.

Quest'ultimo studio in particolare ha, io penso, carattere di novità e di grande interesse, e vale la pena di farne un cenno particolare.

Le tensioni assiali venivano rilevate asportando dal filo, mediante attacco chimico, successivi spessori di materiale. Dalla legge di variazione delle deformazioni assiali al variare dello spessore asportato, si risaliva alla distribuzione delle tensioni residue. La fig. 8, riprodotta dal volume di Shitkow e Pospechow, mostra le tensioni (di trazione al raggio esterno, di compressione al centro) rilevate su due fili del diametro di 3 e 2,8 mm.

Si osservano valori massimi delle tensioni residue assai notevoli, di 30 ÷ 40 kg/mm².

Queste tensioni possono eliminarsi con trattamento termico, oppure con un ulteriore trattamento di deformazione plastica (stiratura, Totziehen dei tedeschi) mediante passaggio su tre rulli, aven-

ti un diametro pari a 10 volte quello del filo, con avvolgimenti di senso opposto.

Il trattamento termico, intorno ai 250° ÷ 270°C, aumenta, secondo gli autori, la durata a flessione dei trefoli del 25 % ÷ 30 %.

I russi hanno inoltre applicato e studiato largamente l'effetto benefico di una trazione iniziale, prima della messa in servizio della fune, già indicato dagli americani A. V. de Forest e L. W. Hopkins nel 1932, la quale è destinata a conferire alla fune stessa maggior compattezza e ad aumentarne la durata.

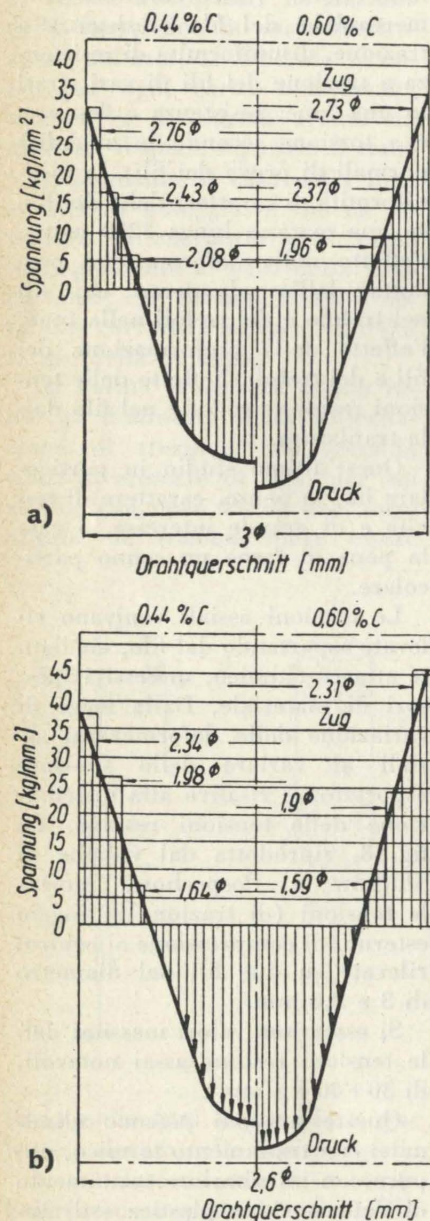


Fig. 8 - Tensioni residue nel filo dovute a una riduzione per trafilatura della sezione: a) al 67%, b) al 70%.

Tale trazione era eseguita gradualmente con carichi assiali pari a

$$\frac{1}{6}, \frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3} \text{ e } \frac{1}{2}$$

del carico di rottura. La diminuzione di diametro delle funi era del 4 ÷ 8 %, essendo il 3 ÷ 5 % da attribuire alla compressione dell'anima tessile, l'1 ÷ 3 % da attribuire all'accostamento dei fili e dei trefoli, con corrispondente maggiore uniformità di ripartizione della sollecitazione. L'aumento di durate era, secondo gli autori, del 25 ÷ 30 %.

Gli autori hanno anche studiato graficamente la forma delle zone di contatto dei trefoli fra di loro e con le gole delle pulegge, per avvolgimenti paralleli e crociati. Con avvolgimento parallelo, la zona di contatto fra filo esterno e puleggia risultava circa tripla che con avvolgimento crociato. In compenso, per ogni passo del trefolo, ogni filo compare sulla superficie della fune 4 volte se l'avvolgimento è crociato, 2 se è parallelo.

Le prove di fatica concordano nel confermare la netta superiorità, già accertata dal Woernle, dell'avvolgimento parallelo su quello crociato.

Per quanto riguarda la questione degli angoli di avvolgimento, vengono discussi i vari sistemi con angolo costante e con angolo variabile, tenendo conto della sollecitazione che l'avvolgimento ad elica produce nei fili dei vari strati e concludendo per la irrazionalità degli avvolgimenti con angolo costante e la superiorità di quelli con passo costante.

Gli autori considerano determinante per la durata della fune il rapporto fra le deformazioni unitarie massime dovute all'avvolgimento nei fili dei vari strati. Coeteris paribus, la durata massima delle funi risulta corrispondente, secondo le loro prove, al valore minimo di questo rapporto, uguale, nelle funi da loro studiate, a circa 1,6.

Un risultato ancora migliore fu ottenuto con una fune nella quale i fili dei vari strati avevano diverse caratteristiche di resisten-

za, scelte in relazione alle diverse deformazioni prodotte dall'avvolgimento nei fili dei vari strati.

È stata anche determinata, per successivi tentativi, tagliando, nella fune, tratti di filo di varia lunghezza e applicando uno sforzo di trazione a una delle estremità tagliate, quale lunghezza di filo era necessaria affinché il filo si rompesse e non si sfilasse dalla fune. Tale lunghezza risultò, a seconda del tipo di avvolgimento e di fune, pari da 1,5 a 6 volte il passo dei trefoli.

Interessante anche lo studio dell'effetto del materiale, dell'impregnamento di lubrificante, dell'anima tessile, della corrosione e dei sistemi di protezione relativi (zincatura, cadmiatura, etc.) su cui per brevità si sorvola.

Gli autori riferiscono infine su prove analoghe a quelle eseguite dal Woernle, e cioè sull'effetto delle dimensioni, della forma e del materiale delle gole, sull'effetto della variazione del rapporto D/d (D=diametro puleggia; d=diametro fune) fra 16,2 e 87, per tensione unitaria di trazione variabile fra 14 e 34 kg/mm², sull'effetto delle flessioni in senso opposto, per effetto delle quali si produrrebbe, secondo gli autori, in condizioni medie, una diminuzione del 35 % circa della durata, in confronto al caso delle flessioni di ugual senso, mentre per rapporti D/d molto piccoli la diminuzione raggiungerebbe circa il 40 ÷ 45 %.

Un risultato degno di attento esame, anche con riguardo ad alcuni lavori che vengono presentati in questo Convegno, è quello riguardante l'effetto sulla durata dell'angolo di avvolgimento. Secondo gli autori tale effetto sarebbe rappresentato da una curva i punti della quale sono ciascuno la media di 16 punti di misura, con quali scarti non si sa.

Nell'intervallo fra i 45° e i 180° la diminuzione dell'angolo di avvolgimento porterebbe, secondo tale curva, a una diminuzione della durata. « Nelle prove, — scrivono gli autori, — è stato accertato che l'accorciamento della vita della fune per effetto della diminuzione dell'angolo di avvol-

gimento deve essere attribuita a un aumentato slittamento della fune sulla puleggia ».

Ho già osservato, a proposito delle ricerche inglesi, come l'angolo di avvolgimento sia una variabile priva in sé di reale significato, e ciò anche a prescindere da qualunque effetto di scorrimento. D'altra parte se esiste, come ci vien detto, uno scorrimento, l'effetto dipenderà, fra l'altro, dal coefficiente di attrito fra fune e puleggia (e quindi dal lubrificante usato), e dal rapporto fra la coppia di inerzia della puleggia, proporzionale all'ampiezza dell'oscillazione e al quadrato della frequenza, al prodotto del raggio della puleggia per la trazione della fune.

In conclusione ritengo che la ricerca di una relazione generale fra angolo di avvolgimento e riduzione di durata sia un problema posto in modo non corretto.

Gli autori hanno condensato il frutto delle loro ricerche in una formula che dovrebbe consentire la previsione della durata, nella quale si tiene conto, mediante opportuni coefficienti, della resistenza unitaria a trazione del filo, del tipo di fune, del diametro della fune e del modo di impiego della fune.

Questa formula appare come la più razionale e completa di quelle esistenti, per il numero di parametri di cui cerca di tener conto.

Le ricerche russe costituiscono indubbiamente un contributo sperimentale molto importante, per il gran numero di prove compiute e di effetti studiati. Presentano anch'esse però il fianco a qualche critica.

Anzitutto non sono date indicazioni sulla dispersione dei risultati sperimentali, per cui la perfetta regolarità di certe curve potrebbe qualche volta far pensare ai risultati di certe elezioni a lista unica.

Inoltre manca per lo più qualunque tentativo di giustificare i risultati sperimentali con calcoli dei possibili ordini di grandezza degli effetti prodotti dalle varie cause (difetto questo già da me rilevato nelle maggior parti delle ricerche inglesi e tedesche), per

cui, come nel caso già ricordato della relazione fra angolo di avvolgimento e durata, può accadere che, riportando materialmente coppie corrispondenti di valori sperimentali di due grandezze, si venga ad affermare fra queste due grandezze una relazione di dipendenza che in realtà non esiste, o è dovuta ad altra causa.

È invece interessante e notevole lo studio approfondito della geometria delle funi dei vari tipi e delle deformazioni relative all'avvolgimento e alla preformazione, mentre resta completamente trascurato lo studio delle sollecitazioni unitarie del filo dovute ai carichi esterni.

Come già ricordato, spetta, per quanto a me consta, al Professor Theophyl Wyss, e ai suoi collaboratori nella EMPA, (Eidgenössische Materialprüfungs- und

sollecitazione nei fili di varie funi, aventi diametri da 19 a 35,6 mm, avvolte su una puleggia del diametro di 1 metro.

La figura 9 mostra la sostanziale coincidenza delle tensioni misurate con quelle della formula di Reuleaux, rappresentate dalla retta per l'origine (i punti fuori della retta corrispondevano al caso di saldature eseguite fra i vari fili per impedirne gli scorrimenti relativi).

In secondo luogo sono state determinate sperimentalmente, per vari tipi di fune e varie sezioni di gola della puleggia, le zone di contatto fra fune e puleggia, e quindi, col calcolo, il carico medio su ogni filo nel contatto.

Sono stati inoltre determinati, col calcolo, e nell'ipotesi semplificativa di assenza di attrito, i carichi che si producono nei contatti

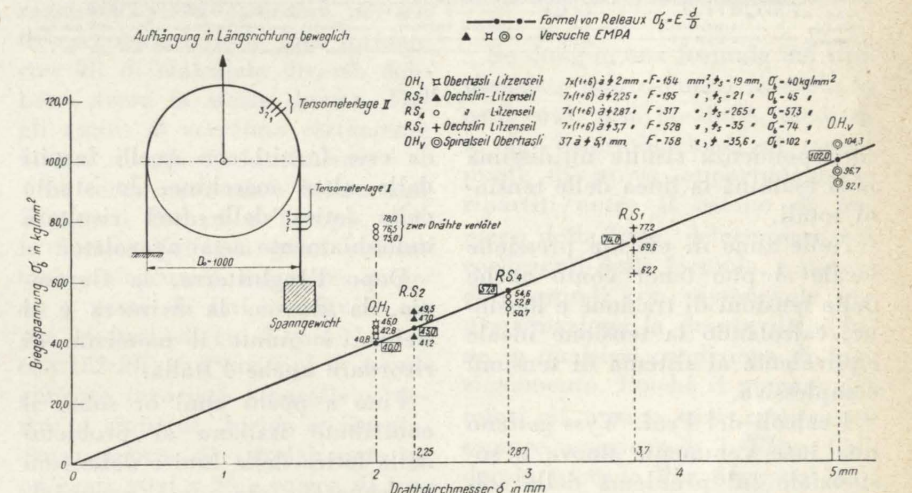


Fig. 9.

Versuchsanstalt) del Politecnico di Zurigo il grande merito di avere, dopo quasi 50 anni di ricerche sperimentali scarsamente illuminate dalla luce del ragionamento analitico, affrontato con chiarezza di idee il problema di una più razionale e completa valutazione delle sollecitazioni elementari del filo, usando con giusto equilibrio calcolo ed esperienza.

Anzitutto l'eterna questione della validità o meno della formula di Reuleaux è stata risolta nel modo più semplice e convincente, un vero uovo di Colombo, misurando a fermo, con estensimetria,

fra i trefoli nella fune, e fra i fili dei trefoli nei trefoli, per effetto di uno sforzo di trazione o di un carico trasversale.

In base ai carichi suddetti, con la formula di Hertz, sono infine state calcolate le sollecitazioni massime.

Inoltre sono state calcolate le espressioni delle cosiddette tensioni secondarie di flessione, dovute al fatto che, quando i fili di vari strati si incrociano, ogni filo viene a comportarsi come una trave incastrata elasticamente agli esterni.

L'importanza delle tensioni di flessione « secondarie » è dimo-

strata in modo impressionante, dalla fig. 10, nella quale il Professor Wyss ha riportato, in funzione del rapporto diametro puleggia/diametro filo, le durate ottenute sperimentalmente da Woernle e Herbst, le tensioni nominali usuali (trazione + flessione secondo Reuleaux); e le tensioni totali (le precedenti, più quelle « secondarie »).

Mentre l'andamento delle tensioni nominali calcolate nel modo solito non mostra una chiara corrispondenza con la durata, tale

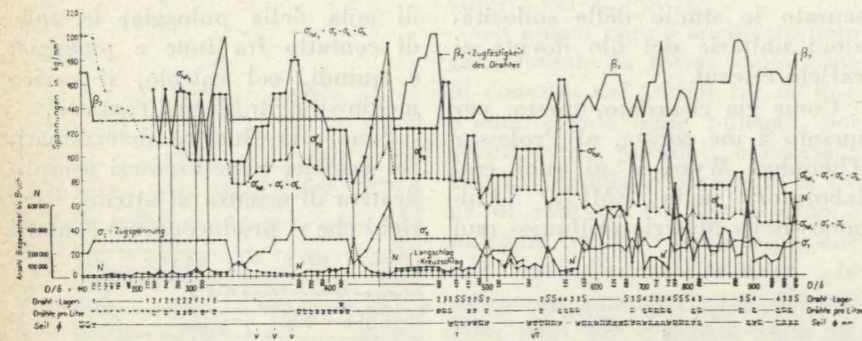


Fig. 10.

corrispondenza risulta nitidissima se si esamina la linea delle tensioni totali.

Nelle zone di elevata pressione locale si può tener conto anche delle tensioni di trazione e flessione, calcolando la tensione ideale equivalente al sistema di tensioni complessivo.

I calcoli del Prof. Wyss gettano una luce veramente nuova e sostanziale sul problema delle sollecitazioni nelle funi.

Personalmente ritengo che, per un'interpretazione razionale dei risultati delle prove di fatica sulle funi, debbano d'ora innanzi essere calcolate, oltre alle consuete sollecitazioni, anche quelle dovute alla flessione secondaria ed alla compressione locale.

È da tener presente che nel Politecnico di Zurigo, dove erano stati compiuti gli studi suddetti, esistevano solo macchine di prova a fatica per i fili (in particolare il Vibroforo Amsler, ad alta frequenza), ma non per le funi.

Desidero inoltre ricordare la promettente attività dei valorosi ricercatori della Association des Industries de la Belgique (A.I.R.),

in particolare degli Ingg. Ramouille, Strebelle, dei due Werwilt partecipanti a questo colloquio, i quali hanno recentemente rivolto la loro attenzione al problema della durata delle funi, sia analizzando le modalità delle prove nelle macchine di fatica, sia costruendo macchine di prova ad alta velocità.

Il modo di funzionamento di queste macchine è alquanto diverso da quello convenzionale; se, come ci auguriamo, l'esperienza potrà confermare definitivamente l'equivalenza dei risultati

da esse forniti con quelli forniti dalle altre macchine, lo studio della fatica delle funi risulterà indubbiamente assai agevolato.

Dopo l'Inghilterra, la Germania, la Russia, la Svizzera e il Belgio, è giunto il momento di ricordare anche l'Italia.

Fino a pochi anni or sono, il contributo italiano ai problemi della fatica delle funi e delle funi in generale era stato essenzialmente un contributo di studiosi isolati, senza carattere di continuità.

Proprio in questo glorioso Politecnico, il Prof. Camillo Guidi, ordinario di Scienza delle Costruzioni, aveva, negli anni 1908-1909, eseguito misure di elasticità e resistenza su una quarantina di cavi metallici, sottoposto a misure ed esami vari 11 funi usate di funicolari, determinando, fra l'altro, a quale distanza da una sezione di rottura un filo tornava a resistere integralmente e aveva anche, nel 1929, fatto costruire una macchina per prove di fatica su funi di funivie, costituita da un carrello del peso di 300 kg che

percorreva nei due sensi una caminata di fune.

Anche il compianto Prof. Pannetti, ordinario di Meccanica applicata alle Macchine, si occupò di funi, soprattutto dal punto di vista teorico, cercando di analizzare l'influenza della elicoidalità dei fili sull'entità delle sollecitazioni di flessione, le pressioni mutue fra i fili dei vari strati o fra i vari trefoli, la contrazione trasversale della fune sotto carico, ed altre questioni.

Nel 1949 furono anche eseguite, dal Prof. Mortarino, prove di fatica su fili in una semplice macchina di sua ideazione, dimostratasi molto pratica, nella quale un filo teso da una molla veniva sottoposto a metà lunghezza, mediante un eccentrico, ad un carico trasversale variabile.

Senza voler minimizzare i contributi che ho ricordati, si deve tener presente che la ricerca sperimentale sistematica su larga scala ha avuto inizio solo negli anni 1952-1955, per iniziativa soprattutto del Prof. Franco Levi, e grazie all'intensa e regolare attività dei suoi collaboratori, in particolare del Prof. Rossetti, col quale ha collaborato successivamente l'Ing. Calderale.

Su una macchina di prova tipo Benoit opportunamente adattata e migliorata furono, dopo un primo periodo di rodaggio, iniziate prove su partite di funi di varie Società, perfezionando man mano le modalità di prova e di interpretazione.

I risultati sono riportati in tre bollettini del Laboratorio Sperimentale Materiali da Costruzione, del Gennaio e Ottobre 1955, e del Gennaio 1959, oltre che in numerose pubblicazioni del Prof. Rossetti e in una dell'Ing. Calderale.

Le variabili principali finora studiate sono state la resistenza unitaria del filo, il carico totale, e il rapporto di avvolgimento puleggia fune. Sono anche state eseguite prove di confronto tra funi con vari avvolgimenti.

In complesso sono state eseguite finora circa 400 prove di fatica, corrispondenti a durate intorno, per lo più, ai 100-200-400 mila cicli.

Anche in queste ricerche si è seguita essenzialmente la tradizione della sperimentazione precedente e non è ancora stata tentata una interpretazione teorico-numerica più approfondita.

La brevità del tempo mi impedisce di parlare delle numerose ricerche a carattere isolato e meno continuativo compiute negli stessi paesi di cui già ho parlato, e in tanti paesi del mondo, in particolare nel Giappone e negli Stati Uniti.

Ritengo invece doverosa qualche parola di presentazione e di commento per i 17 lavori che sono stati considerati come relativi al tema della mia relazione, e che ricorderò seguendo in linea di massima l'ordine con cui sono riportati nei volumetti del Congresso, procedendo però talora ad opportuni raggruppamenti.

Gli accenni e le osservazioni che esporrò vogliono fornire soprattutto degli spunti per la discussione, alla quale certo i partecipanti al colloquio vorranno apportare il prezioso contributo della loro esperienza.

Ricordo dapprima un gruppo di tre ricerche a carattere industriale.

Nella prima, dovuta al Direttore della Società Industrie Metallurgiche Piemontesi, Sig. R. Aldè, si riferisce su prove di fatica di confronto eseguite su funicelle del diametro di 6 mm, con macchina alternativa, su gola di puleggia a sezione rettilinea, allo scopo di confrontare due qualità di acciaio, con tre diversi processi di patentamento, quattro tipi di avvolgimento (crociato e parallelo, ciascuno con due passi del filo nel trefolo in diverso rapporto col passo del trefolo nella fune). Sono state eseguite in tutto 230 prove di durata, per un numero di cicli (diritto-arco di cerchio-dritto) uguale a due volte i numeri riportati nelle tabelle, i quali oscillano, nei vari casi, tra 20.000 e 100.000 circa.

Lo studio costituisce un esempio tipico di ricerca industriale limitata a prove di confronto, tendenti ad ottenere un miglioramento della produzione.

La seconda ricerca è stata com-

piuta negli stabilimenti Fornara, sotto la direzione del Dott. Scorrano. Sono state eseguite 24 prove di fatica su tre funi di 150 fili, con una macchina alternativa tipo Benoit. Lo scopo delle prove, come annunciato nel testo, non risulta troppo chiaro. Gli sperimentatori volevano dimostrare che al variare della percentuale di carbonio esiste un optimum di riduzione di trafilatura, di cui essi indicano i valori numerici, realizzato il quale, funi costruite con materiali a diverso tenore di carbonio, dovrebbero, più o meno, avere la stessa durata.

Questa impostazione non appare troppo chiara. Anzitutto occorrerebbe conoscere in che modo gli autori siano arrivati a prevedere i valori numerici ottimi delle riduzioni di trafilatura al variare della percentuale di carbonio. Inoltre non è evidente che, raggiunti questi optimum nei fili di vari materiali, le funi formate con fili di materiale diverso debbano avere la stessa durata. Dagli autori ci verranno certamente forniti maggiori chiarimenti.

La terza memoria è dovuta agli Ingegneri Picozzi e Testero, della Società Falck, i quali presentano un'accurata relazione intorno a prove di fatica eseguite sopra 16 funi, di cui 8 con 114 e 8 con 152 fili, con vari tipi di avvolgimento (crociato e parallelo, destro e sinistro), lucide e zincate, con rapporto di avvolgimento su puleggia pari a 29 e carico di trazione pari a 1/6 di quello di rottura.

I risultati confermano in generale quanto già era noto al riguardo, e cioè la superiorità dell'avvolgimento parallelo su quello crociato e delle funi zincate su quelle lucide. Il fatto che per ogni tipo di fune sia stato sperimentato un solo esemplare (o forse due, giacché non è evidente quale differenza possa portare il cambiamento del senso di avvolgimento) consiglia l'esecuzione di ulteriori prove, già del resto annunciate dagli stessi autori.

L'Ing. Calderale, dell'Istituto di Costruzione di Macchine del Politecnico di Torino, ha eseguito 114 nuove prove di fatica su

funi ed ha provato a vedere se anche questi risultati potevano essere espressi con una formula del tipo già da lui proposto in un precedente lavoro, e cioè: durata eguale a una costante, per il prodotto di una certa potenza del rapporto diametro puleggia al diametro fune, per un'altra potenza del rapporto carico di trazione al carico di rottura.

Nel lavoro suddetto, l'Ing. Calderale aveva infatti trovato che, mediante questa formula, era possibile rappresentare con ottima approssimazione i risultati di circa 120 misure. Nello studio qui presentato resta confermato che anche i 114 risultati delle nuove prove sono rappresentati assai bene dalla formula suddetta, mentre le formule generali proposte dai vari autori per il calcolo delle durate forniscono risultati assai diversi da quelli misurati.

Se dunque una formula del tipo ricordato può ritenersi valevole in ogni caso, sarà possibile, mediante la determinazione di pochi punti di prova opportunamente ripartiti entro il campo di impiego della fune, determinare i 3 coefficienti della formula, e prevedere quindi con ragionevole approssimazione la durata della fune in qualsiasi condizione di funzionamento. Poiché il numero dei punti di misura sarà certamente sempre maggiore di 3, l'Ing. Calderale prevede l'impiego del metodo dei minimi quadrati, del quale sviluppa le formule in questo caso particolare.

Per amore di completezza storica, devo far presente che la proporzionalità approssimata della durata ad una certa potenza del diametro della puleggia e ad una certa potenza del carico era già stata rilevata da D. Adamson per un gruppo di funi sperimentate dallo Wire Ropes Research Committee, durante la discussione del terzo Report, nel 1928, mentre, nel 1934, lo Herbst aveva osservato nei risultati delle sue prove la proporzionalità della durata ad una certa potenza del rapporto diametro puleggia al diametro filo.

Comunque il fatto che l'Ingegnere Calderale abbia, senza conoscere le osservazioni dei due autori citati, le quali d'altronde non sono affatto in evidenza nella letteratura, riscontrato leggi di variazione della durata analoghe a quelle da essi osservate, sembra costituire una buona conferma della validità del tipo di formula da lui proposto.

L'Ing. Davin e il Sig. Bruckert, del Laboratoire Central des Ponts et Chaussées di Parigi, presentano i risultati di un esame di rotture statiche di funi aventi diametri esterni da 22 a 30 mm. Con tali funi venivano formati anelli chiusi, messi in trazione mediante due rulli uguali del diametro di 12 cm, solidali agli attacchi di una macchina di prova, e intorno a ciascuno dei quali la fune risultava pertanto avvolta per un arco di 180°.

In queste condizioni si ottennero riduzioni percentuali del carico statico di rottura dal 7% al 25%.

Gli autori hanno eseguito un diligente esame delle impronte e degli scorrimenti tra filo e filo e ritengono che la causa principale della diminuzione di resistenza sia da attribuire all'effetto di intaglio per strisciamento relativo dei fili dei trefoli vicini.

Questo effetto è dovuto evidentemente a due cause: pressione unitaria e scorrimento, di cui, secondo ogni probabilità, la prima è causa primaria e la seconda secondaria, nel senso che a produrre le impronte può essere sufficiente una pressione senza scorrimento, ma non uno scorrimento senza pressione.

Perciò io penso che insieme alla ricerca minuziosa degli scorrimenti, sarebbe stato interessante eseguire quella delle pressioni locali.

Il Prof. Ferro, dell'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, presenta un suo tentativo di determinare la distribuzione statistica delle durate a fatica delle funi metalliche, con l'intenzione di giungere ad un confronto con la distribuzione statistica delle durate dei fili elementari costituenti le funi.

Il problema affrontato appare di soluzione molto ardua. Infatti, mentre nel caso dei fili o delle provette sottoposte a prove di laboratorio le due grandezze fra le quali deve determinarsi la relazione da un punto di vista statistico sono perfettamente determinate (numero di cicli e tensione massima), nel caso di una partita di funi perfettamente uguali, come geometria, come costruzione e come materiale, montate su pulegge di ugual materiale e con uguale sezione di gola, la durata dipende da due variabili: raggio della puleggia e sollecitazione di trazione.

L'autore, per evitare eccessive complicazioni, sulla base di alcuni risultati sperimentali relativi a una data fune sottoposta a circa 40 prove di fatica, ammette che la durata dipenda dalla somma della sollecitazione di flessione secondo Reuleaux e da una frazione di quella di trazione, la quale frazione dovrebbe tener conto delle sollecitazioni di flessione secondarie corrispondenti agli effetti di pressione fra i fili dei vari strati. Evidentemente una equivalenza così stabilita non può avere che carattere approssimato e convenzionale.

Perciò il ricercare la distribuzione statistica di una quantità di significato incerto, quando anche quelle di significato certo sono soggette per la loro natura a svariate cause di dispersione, porta a risultati convenzionali limitati alla particolare fune studiata, e di significato non completamente chiaro.

Il fatto che la dispersione dei valori della tensione equivalente, calcolata nel modo detto, in funzione della durata, sia risultata relativamente piccola in confronto a quanto accade nelle prove di fatica dei fili singoli, può costituire una certa conferma della generica attendibilità di calcoli del genere, pur dovendo tener conto del fatto, posto in luce dall'A, che una tale diminuzione era comunque prevedibile, in quanto il comportamento globale della fune dipende dalla somma dei comportamenti di un complesso di molti fili, nel quale gli

effetti delle disuniformità dei fili singoli tendono naturalmente a compensarsi.

Non mi sento tuttavia di condividere con eccessiva fiducia la speranza espressa dall'autore a conclusione del suo lavoro che i risultati di indagini del genere possano contribuire tra l'altro a comprendere meglio la natura delle variabili che modificano la resistenza a fatica delle funi.

Sempre in tema di indagini statistiche, l'Ing. Luboz, del Laboratorio Prove Materiali del Politecnico di Torino, sottopone ad analisi statistica i risultati di prove di trazione, flessione e torsione su fili, e di prove di trazione su spezzoni di funi, eseguite secondo le prescrizioni italiane per le funivie, determinando i valori degli scarti quadratici medi per le varie grandezze ricordate.

Lascio agli esperti di problemi di statistica la valutazione dei possibili sviluppi di indagini del genere.

Il Prof. Gatto, Direttore del Servizio Assistenza Ricerche Industriale del Consiglio Nazionale delle Ricerche, riferisce sopra un programma di prove di fatica da eseguire presso il laboratorio Prove Materiali del Politecnico di Torino per confrontare le durate di funi di diverso tipo. È prevista la sperimentazione di 12 tipi di funi, tutte con 114 fili e diametro di 12 mm.

L'Ing. Lehaneur, Ingegnere capo des Ponts et Chaussées, riferisce sopra misure di rigidità eseguite su cavi metallici in una macchina di prova costituita da una ruota di 4 m di diametro, portante alla periferia 50 pulegge di piccolo diametro folli sul loro asse, essendo il cavo teso intorno ad essa per un arco di circa 180°.

È risultato dalle misure, interpretate con la formula di Isaachsen, che la rigidità dei cavi sperimentati nella macchina sopradetta si manteneva sempre molto superiore a quella corrispondente alla somma dei singoli momenti di inerzia dei fili e ciò in contrasto con una precedente teoria dello scompaginamento della fune.

La questione è molto complessa e impegna da parecchi anni le

ricerche dell'Ing. Lehaneur, il quale, in un ponderoso lavoro di ben 67 pagine, ha svolto recentemente una lunga e sottile analisi delle possibili interpretazioni e cause del fenomeno, analisi che qui non è possibile nemmeno riassumere.

Dopo che il problema è stato così sviscerato a fondo per via teorica, mi permetto di accennare all'idea di possibili misure estensimetriche per accertare lo stato di tensione dei fili esterni, mentre rivolgo all'Ing. Lehaneur l'augurio che il suo paziente e sottile lavoro di ricerca possa presto condurlo al chiarimento completo dell'interessante problema.

Lo studio del Prof. Gillemot, del Politecnico di Budapest, pone in luce la causa delle rotture di fatica che spesso si producono in corrispondenza alle giunzioni eseguite mediante manicotto. Nella zona del manicotto la rigidità flessionale della fune risulta fortemente aumentata, e non è quindi più possibile usare senz'altro la formula di Isaachsen, la quale presuppone, come è noto, l'estensione indefinita della fune dalle due parti del punto di applicazione del carico.

Tenuto conto di ciò, si modificano le condizioni ai limiti della soluzione e si trova, a calcoli fatti, che la sollecitazione di flessione è compresa fra una o due volte quella che si avrebbe nel caso di fune indefinita.

Ciò spiega la frequenza delle rotture per fatica in prossimità delle giunzioni a manicotto.

Il riassunto del Prof. Gillemot riporta solo i risultati sopra detti, senza indicare il procedimento seguito, che però penso sia senz'altro quello da me accennato.

Dopo le dure esperienze dell'Ing. Lehaneur sull'applicazione della formula di Isaachsen a casi che si discostano per qualche motivo da quello normale, penso che la teoria precedente potrebbe essere molto utilmente verificata ed integrata mediante misure estensimetriche eseguite in prossimità del giunto.

Ritengo che un particolare rin-

graziamento debba essere rivolto al Dr. Ing. I. Nishioka, il quale è venuto a noi dal dolce paese dei ciliegi, affrontando un così lungo viaggio, per illustrarci, forte della sua più che trentennale esperienza in fatto di funi, un semplice e ingegnoso apparecchio da lui costruito per il rilevamento della geometria delle funi e quindi della qualità e precisione della loro costruzione.

L'apparecchio registra sopra un foglio di carta bianca, premuto sul contorno della fune con l'interposizione di un foglio di carta carbone, l'aspetto della superficie della fune, e dalla figura ottenuta si possono rilevare una quantità veramente notevole di elementi geometrici.

Le diapositive che l'Ing. Nishioka ha promesso di mostrarci illustreranno, meglio di ogni spiegazione verbale, le possibilità dell'apparecchio.

Ricordo che anche il Professor Wyss, per determinare le zone di mutuo contatto, era ricorso all'interposizione fra fune e puleggia di un sottile foglio di carta di seta giapponese (Japanische Seidenpapier) combaciante con un foglio di carta carbone.

L'Ing. Rebecchi propone la raccolta, in schede perforate, dei risultati delle prove di fatica sulle funi, indicando il modo di utilizzare le circa 70 perforazioni di cui dispongono le schede I.B.M.

Naturalmente possono immaginarsi altri dati, oltre a quelli previsti nell'elenco proposto, quali ad esempio prove di resistenza residua, misure dei numeri dei fili man mano rotti, prove sull'effetto dei vari lubrificanti etc.

Per inserire anche questi dati, occorrerebbe eliminarne altri, riducendo ad esempio il numero degli intervalli di certe grandezze.

Ma anche senza arrivare ad una meccanizzazione completa, penso che l'idea dell'Ing. Rebecchi meriti di essere accolta, almeno con la creazione di uno schedario a soggetto, secondo le normali tecniche bibliografiche, con schede contenenti, oltre alle indicazioni bibliografiche, i dati ed i risultati delle prove.

Poiché il materiale esistente è relativamente poco abbondante, penso che anche uno schedario di questo genere costituirebbe un valido aiuto per gli studiosi.

Gli Ingg. Strebelle e Ramioulle, della A.I.B., svolgono alcune considerazioni sulle prove di fatica delle funi per flessione su puleggia.

La parte più interessante dello studio è costituita, a mio avviso, dall'esame del tipo di cicli di flessione al quale sono sottoposti i vari tratti di fune nelle prove di flessione.

Come è stato giustamente posto in luce dagli autori anche in recentissimi bollettini della AIB, a seconda della disposizione delle pulegge e della ampiezza della oscillazione della fune, possono aversi tratti di fune sottoposti o a flessioni ripetute sempre di ugual senso, o a flessioni alternate, di senso successivamente opposto, o a cicli più complessi.

Indubbiamente, per avere risultati confrontabili con le varie macchine di prova, deve essere precisata la forma del ciclo a cui è sottoposto il tratto di fune più affaticato e bisogna che questo tratto non sia troppo corto rispetto al passo della fune.

È merito degli autori l'aver chiarito in modo esatto questi concetti, intorno ai quali regnava finora una certa confusione.

L'Ing. Thaon di Revel riferisce sulla macchina di prova per funi allestita presso il Laboratorio Sperimentale dei Materiali da Costruzione del Politecnico di Torino.

La macchina è sostanzialmente del tipo classico convenzionale, ma con parecchi miglioramenti e adattamenti (ampie possibilità di regolazione della corsa, fino a due metri) e del carico fino a 25 tonn, dispositivo di registrazione delle deformazioni etc. La frequenza può essere di 25 o 50 oscillazioni al l'.

In tema di macchine di prova accenno anche ad una macchina da me studiata, di cui la fig. 11 rappresenta il complessivo schematico, allo scopo di consentire una

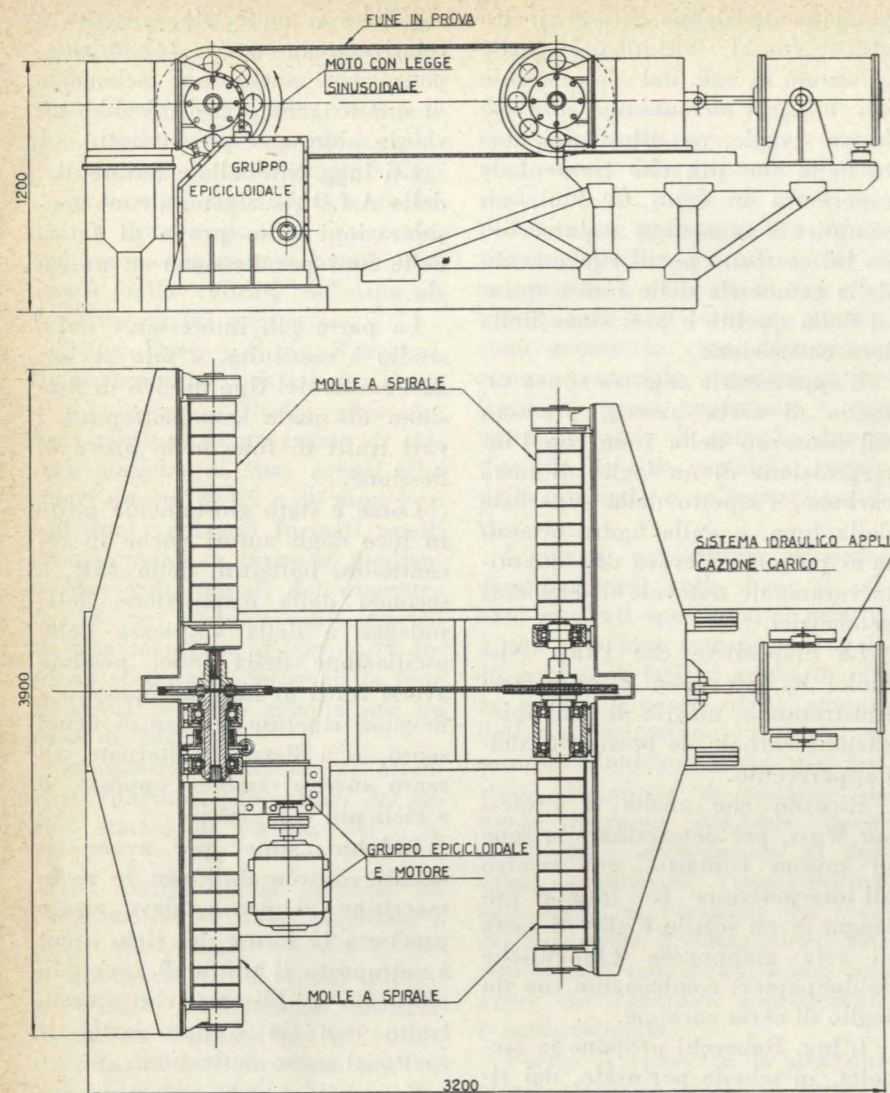


Fig. 11.

velocità di prova notevolmente più elevata di quella delle macchine convenzionali, senza gli inconvenienti derivanti dalle forze di inerzia, le quali, per comune riconoscimento degli sperimentatori, sono causa di scorrimenti e di alterazioni dei risultati.

Il concetto essenziale della macchina è quello di equilibrare le forze di inerzia delle pulegge mediante un sistema di molle, facendo funzionare la macchina in risonanza.

La difficoltà di avere insieme frequenza elevata (si spera di arrivare fino a 4 ÷ 8 oscillazioni al secondo) e oscillazione ampia è stata superata disponendo un certo numero di molle a spirale in parallelo.

Inoltre, per avere un perfetto

equilibramento delle forze di inerzia in ogni istante dell'oscillazione, il comando dell'oscillazione stessa avviene con legge sinusoidale, mediante un rotismo epicicloideale nel quale una ruota dentata satellite ruota internamente ad una ruota dentata di raggio doppio. Per velocità costante del portatreno, un punto della primitiva del satellite si muove, come è noto, con moto rettilineo sinusoidale, e si può così, mediante un perno di comando ivi applicato e una semplice trasmissione, realizzare un'oscillazione perfettamente sinusoidale. Si osservi che le forze di inerzia alterne possono essere perfettamente equilibrate mediante due contrappesi, l'uno applicato sul satellite a 180° dal perno di comando, l'altro appli-

cato sul portatreno. Se la macchina, che è ancora in fase di montaggio, funzionerà secondo le previsioni, si potranno per la prima volta ottenere risultati esenti dagli effetti di inerzia delle masse in movimento, malgrado una frequenza sensibilmente più elevata di quella delle macchine convenzionali.

Tornando alle memorie del colloquio, il Dr. Ing. Westhauser della Werkstoffprüfstelle des Technischen Überwachungs-Vereins Bayern-München, presenta un estratto di un suo più ampio lavoro sopra l'influenza della temperatura di fusione delle teste sulla resistenza a fatica della fune, o, per meglio dire, sulla resistenza a flessione rotante con precarico dei fili costituenti la fune. Infatti, secondo quanto dichiara, l'autore ha eseguito le prove a flessione rotante onde poter realizzare una velocità di prova economica. A tale scopo ha costruito una macchina che fa rotare attorno al proprio asse il filo, teso mediante una molla attorno ad una sagoma di legno duro con profilo circolare.

L'autore ha trovato anzitutto che, come era del resto naturale,

GRUPPO EPICICLOIDALE

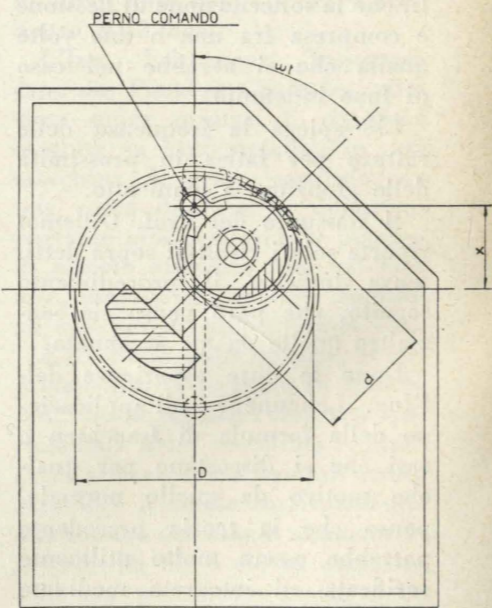


Fig. 12.

$$D = 2d \quad X = d \sin(\omega t)$$

l'effetto di una data temperatura, del metallo di fusione sulla resistenza del filo è uguale a quello della stessa temperatura ottenuta in forno e inoltre che la diminuzione di resistenza a fatica per effetto del riscaldamento suddetto è maggiore per i fili di diametro minore, i quali tuttavia hanno, come è noto, resistenza a fatica maggiore.

Riguardo a questa ricerca, si può osservare che la sollecitazione dei fili nelle teste fuse è prevalentemente di trazione variabile, piuttosto che di flessione, e che inoltre la sollecitazione di flessione a fatica è di flessione piana piuttosto che di flessione rotante.

Ricordo inoltre che prove a fatica su fili con velocità ancora più economica di quella raggiungibile nelle prove a flessione rotante sono quelle oggi diffusissime che si effettuano col Vibroforo Amsler, col quale si raggiungono frequenze fino a circa 6000/1'.

Anche i Proff. Collari e Greco e il Dr. Viridis hanno eseguito una ricerca analoga alla precedente per un ampio intervallo di temperature, determinando le caratteristiche statiche dei fili trattati (carico di rottura, allungamento, numero di piegamenti a flessione e di giri a torsione continua). La loro ricerca è perciò

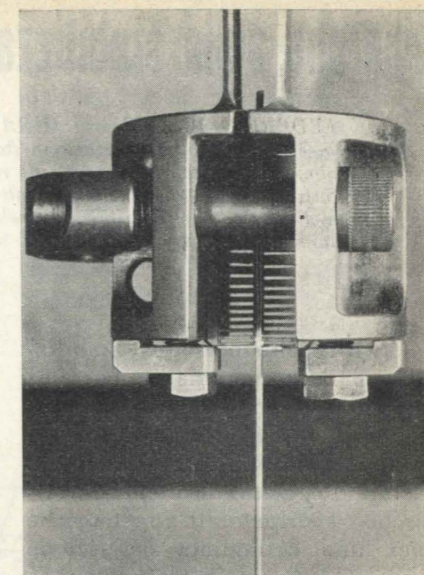


Fig. 14 - Istituto di Costruzione di Macchine del Politecnico di Torino - Particolare dell'attacco elastico a pettine per montaggio su Vibroforo Amsler di un filo metallico in prova di fatica a trazione. L'elasticità delle lamine del pettine dà luogo ad una ripartizione del carico trasversale di serraggio di intensità unitaria variabile gradualmente, in modo da evitare rotture di fatica negli attacchi.

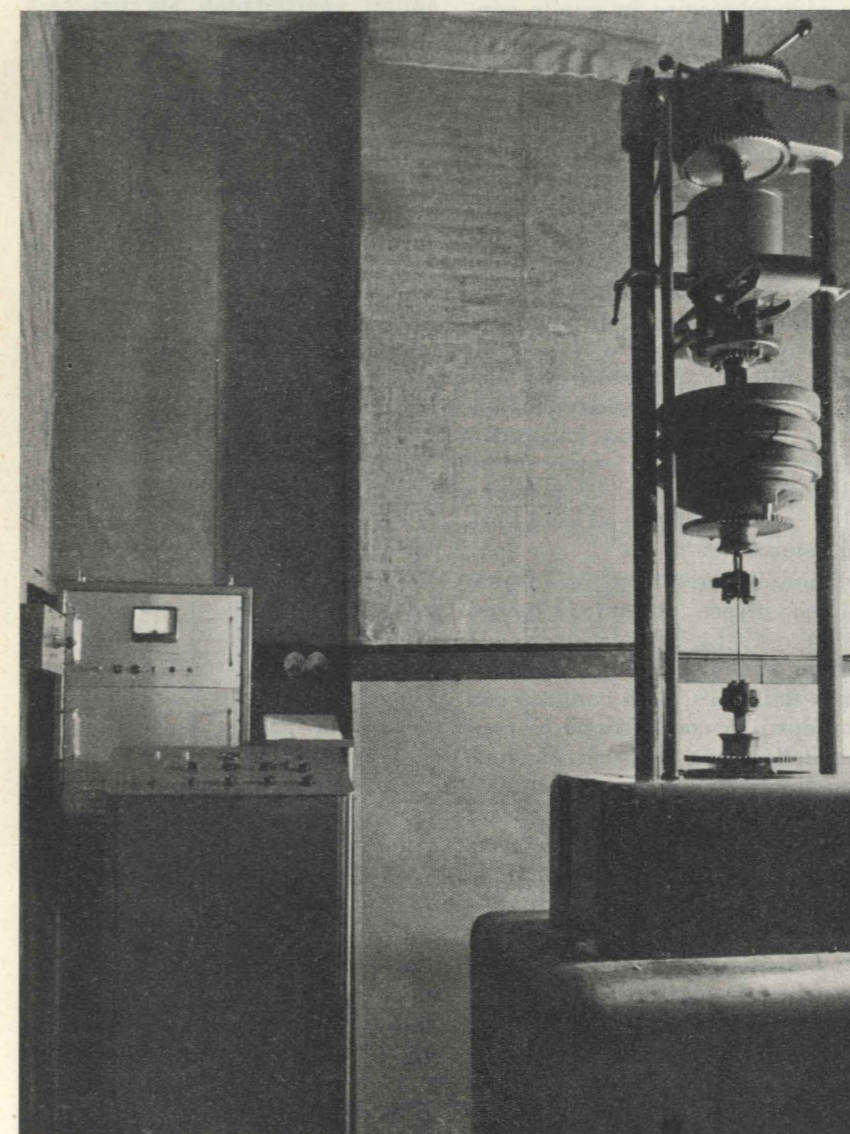


Fig. 13 - Istituto di Costruzione di Macchine del Politecnico di Torino - Vibroforo Amsler per prove di fatica ad alta frequenza, con pannello elettronico di comando, in cabina insonorizzata. È visibile un filo di fune in prova alla frequenza di 5500 periodi al primo.

in un certo senso complementare di quella dell'Ing. Westhauser.

Ricordo infine una breve notizia, illustrata da una fotografia della Société pour le Perfectionnement des Matériels d'Équipement Aéronautique, intorno a un banco di prova per cavi aeronautici, che possono essere in esso sottoposti a trazione e torsione simultanea.

Così le indagini pazienti degli studiosi continuano ad investigare i segreti della fune, di questa vegliarda più che centenaria, la quale sembra continuamente risorgere a nuova giovinezza, e i ricercatori di tutti i paesi del mondo si sentono, pur nelle inevitabili discussioni scientifiche, affratellati nello sforzo comune per chiarirne i problemi ancora insoluti.

Sono certo che questo colloquio, per il valore degli studi presentati, per la presenza dei rappresentanti di tante nazioni, per i vivaci e fecondi dibattiti che indubbiamente ne scaturiranno, darà nuovo impulso alla nostra comune fatica di studiosi, e renderà più saldi i nostri legami di collaborazione scientifica e di personale amicizia.

Renato Giovannozzi

Corrispondentemente due sono i possibili meccanismi di estinzione: — per estinzione della fiamma pilota, quando non possono essere più soddisfatte contemporaneamente le (2) e (3);

— per mancata possibilità di propagazione della fiamma principale; le condizioni per cui ciò avviene non sono purtroppo, allo stato attuale delle nostre conoscenze, esplicitabili se non sotto forma di relazioni del tipo della (1) o della (4) contenenti funzioni di ϕ da determinare empiricamente. In questo caso la fiamma pilota può evidentemente continuare a sussistere sotto forma di fiamma residua.

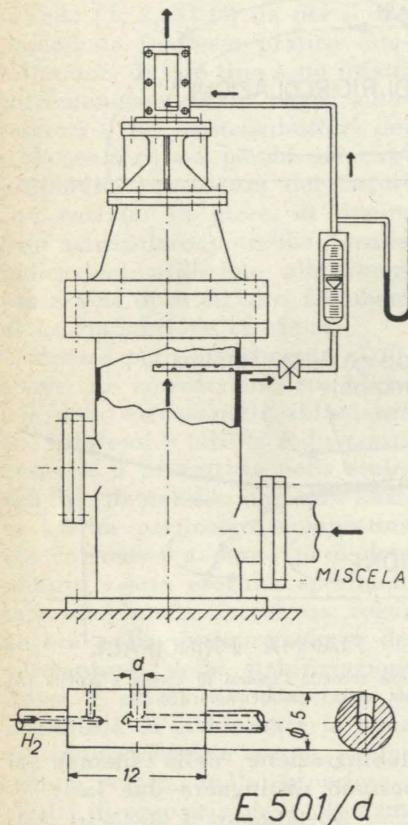


Fig. 2 - Schema del combustore e stabilizzatore impiegato per gli esperimenti di iniezione di miscela.

In pratica il primo meccanismo di estinzione non pare abbia rilevanza, se non per determinare le condizioni in cui si ha anche l'estinzione della fiamma residua. Ed anche in questo caso occorre tener conto del fatto che [12, 13, 14] i gas riciccolati non provengono, almeno alle maggiori velocità U , unicamente dalla reazione chimica « pilota » ma anche da quella della fiamma principale

(infatti i confini a valle della zona di ricircolazione non sono mai perfettamente definiti) cosicchè l'estinzione di quest'ultima può comportare anche quella della fiamma residua giacchè si ha ingresso nella zona di ricircolazione di miscela parzialmente o totalmente incombusta [12, 13].

Un meccanismo di tal genere darebbe ragione di molte osservazioni sperimentali, dalle più evidenti: quali l'aspetto stesso del fronte di fiamma a valle dello stabilizzatore (figg. 1 e 5); l'esistenza di fiamme residue solo per velocità U_e inferiori ad un certo limite; la costanza della temperatura e composizione della zona di ricircolazione anche all'atto dell'estinzione in quei casi [5] in cui probabilmente si aveva una fiamma residua, mentre in altri si osservava, subito prima dell'estinzione totale, la presenza di « sacche » di incombusti; le violente pulsazioni della fiamma principale che precedono spesso l'estinzione lasciando apparentemente indisturbata la zona di ricircolazione; alle più sottili distinzioni tra regimi laminari e turbolenti nella zona di separazione tra fiamma pilota e miscela incombusta, ed in generale di tutte le interpretazioni dedotte dalla ipotesi di Zukoski che rimane pienamente valida qualora si intenda che τ non è un ritardo all'accensione corrispondente ad accensione spontanea ma bensì ad accensione spontanea per radicali e quindi funzione anche della velocità di propagazione della fiamma. Osserviamo a questo proposito che alcune misure effettuate da Potter [15] mostrano come τ , a parità di ogni altra condizione, vari poco al variare della natura del combustibile (per idrocarburi), come appunto accade per la velocità di propagazione della fiamma e al contrario dei ritardi di accensione misurati con i metodi convenzionali [7].

Infine si comprende come anche l'ipotesi di Longwell, pur completamente estranea alla realtà sperimentale, potesse fornire risultati qualitativamente corretti giacchè si ha effettivamente una zona in cui la reazione chimica avviene all'incirca in condizioni omogenee anche se non si tratta della zona

di ricircolazione ma di quella in cui inizia la fiamma principale.

Una prima dimostrazione della validità del meccanismo proposto si ha nell'osservazione, fatta da tutti gli sperimentatori ma mai spiegata soddisfacentemente, che l'estinzione inizia a valle della zona di ricircolazione.

Normalmente il fenomeno dell'estinzione avviene così rapidamente da non consentire una sua analisi dettagliata; nel quadro degli esperimenti descritti in [12] si è però riscontrato un andamento dell'estinzione a stadi, stabili, successivi che rispecchia esattamente quanto ipotizzato. Infatti, iniettando piccolissime quantità di aria nella zona di ricircolazione, quando l'estinzione avveniva per $\phi > 1,2$ (cioè per dosature più ricche di quelle corrispondenti, a quelle velocità, ai limiti di stabilità senza iniezione di aria) si verificavano successivamente, aumentando ϕ a U costante:

— insorgere di fenomeni di instabilità nella fiamma principale, evidenti dal brusco aumento di rumorosità e dalle oscillazioni della pressione nel condotto;

— intermittenza nella propagazione della fiamma principale, pulsante con frequenza molto bassa (0,5-1 Hz) e perfettamente costante;

— estinzione della fiamma principale e sussistenza di una fiamma residua.

In ogni caso la zona di ricircolazione non appariva risentire dei fenomeni che avvenivano a valle di essa (3).

Allo scopo di ottenere una ulteriore conferma sperimentale della validità del meccanismo proposto è stata effettuata la presente serie di esperimenti iniettando nella zona di ricircolazione quantità variabili di miscela aria-combustibile preformata avente la medesima dosatura della corrente principale in modo da evitare ogni variazione locale dei parametri chimici.

Esperimenti simili sono stati effettuati da Wong [17] iniettando

(3) Una conferma dell'esistenza di un'analogia successione di eventi anche nel caso di estinzioni senza iniezione di gas si è ottenuta riprendendo il fenomeno con una cinepresa ad alta velocità (Fastax).

do però miscela aria-idrogeno mentre il combustibile principale era il propano e quindi essi non sono confrontabili con quelli qui descritti.

3. L'attrezzatura sperimentale impiegata è quella stessa usata per altre ricerche [12, 13, 16] e dettagliatamente descritta in [18]. La camera di combustione (fig. 2) aveva sezione rettangolare di mm 12 x 50 con le due facce maggiori in quarzo, lunghezza 130 mm; la fiamma era stabilizzata su un cilindro di diametro 5 mm. La miscela iniettata veniva presa dalla camera di calma, misurata mediante un rotometro e addotta, con un condotto assiale passante attraverso una delle finestre di quarzo, ad un foro radiale a spigolo vivo, di diametro d variabile da 0,5 a 2 mm, praticato nel centro dello stabilizzatore e rivolto verso valle.

L'intensità della turbolenza, in assenza di combustione e dello stabilizzatore, era mediamente dello 1,6 % nella posizione corrispondente allo stabilizzatore stesso.

La combustione veniva iniziata mediante iniezione pilota di idrogeno dallo stabilizzatore, impiegando una condotta completamente separata da quella della miscela iniettata, in quanto si è riscontrato come la presenza di sole tracce di H_2 potesse falsare completamente i risultati, ed un arco elettrico scoccante tra lo stabilizzatore ed un elettrodo retrattile. Per ogni valore della portata di miscela iniettata, G' , venivano determinati i limiti di stabilità della fiamma (fig. 3) raggiungendo l'estinzione o per lenta variazione della portata di combustibile principale a velocità costante oppure per variazione di questa ultima con dosatura all'incirca costante.

Il combustibile impiegato era propano commerciale tratto da bombole. In ogni caso la camera di combustione sboccava in un ambiente a pressione atmosferica e tutti i gas si trovavano al suo ingresso a temperatura molto prossima a quella ambiente.

I risultati sono stati diagrammati sotto forma di curve di stabilità (fig. 3) riportando i valori della velocità media a monte dello

stabilizzatore all'atto dell'estinzione, U_e , in funzione della dosatura ϕ della corrente; da tali curve si è tratto il diagramma di fig. 4 che, per vari valori del diametro d del foro di iniezione della miscela, riporta i valori della massima U_e possibile in funzione della portata G' iniettata.

Ovunque possibile le curve di stabilità sono state determinate almeno due volte a distanza di tempo e impiegando combustibile tratto da bombole diverse (ciò che può spiegare la dispersione dei punti di fig. 4 in conseguenza delle variazioni di composizione, particolarmente per quanto riguarda la concentrazione di propilene, del propano impiegato).

In figg. 5, 6, 7, 8 sono riportate alcune delle fotografie della zona di ricircolazione (4) eseguite, con e senza iniezione di miscela, per vari valori di d .

In ogni caso (fig. 4) l'iniezione di miscela ha consentito la stabilizzazione della fiamma a velocità U superiori alla $U_{e, max}$ per il medesimo stabilizzatore nelle medesime condizioni ma senza iniezione, mantenendo invariato il valore di ϕ corrispondente alla massima U_e ($\phi = 1,025$).

Per i valori minori di d (0,5 e 0,75 mm) la $U_{e, max}$ con iniezione è funzione rapidamente crescente di G' ed essenzialmente indipendente da d , solo ai massimi valori di G' ottenibili si nota una inflessione nella curva di fig. 4.

Con diametri maggiori del foro di iniezione della miscela sono necessarie, per avere le medesime $U_{e, max}$, portate iniettate G' proporzionalmente molto più elevate e, per i d maggiori, le curve di fig. 4 presentano un massimo al di là del quale $U_{e, max}$ decresce al crescere di G' . È inoltre evidente l'influenza del diametro d anche se questa tende a diminuire al crescere di d .

Tranne che nel caso di portate G' molto piccole iniettate con bassa velocità la miscela formava

(4) Dati tecnici: macchina fotografica Exakta II, obiettivo Macrokillar E, 1:2,8, $t=1/25''$, pellicola Ferrania P 30, filtro giallo, distanza 20 cm. Sono visibili, oltre ai punti di riferimento a distanza di 25 mm lungo l'asse, anche striature non eliminabili delle finestre di quarzo.

una fiammella nell'interno della zona di ricircolazione, visibile nelle figg. 6, 7, 8, le cui caratteristiche variavano sensibilmente al variare di G' e di d pur prestandosi abbastanza bene ad una interpretazione come « fiamma di diffusione », nella quale cioè il fattore predominante è il miscelamento tra la miscela incombusta e i prodotti della combustione riciccolati.

Con velocità V' del getto di miscela iniettata molto basse, sensibilmente inferiori a quella presumibile dei gas riciccolati, il rapidissimo miscelamento impedisce ogni reazione chimica e la miscela incombusta è trascinata nella zona di accensione della fiamma pilota cosicchè nell'interno della zona di ricircolazione non ha luogo nessuna, apprezzabile, combustione.

Per V' un po' superiori la miscela può in parte reagire ai lati del foro di iniezione pur non avendosi ancora la formazione di una fiammella vera e propria.

Crescendo ulteriormente V' l'aspetto della fiammella è diverso a seconda del valore di d : se questo è sufficientemente piccolo (figura 6) si ha la formazione di una ben distinta « fiamma di diffusione » che si estende lungo l'asse della zona di ricircolazione.

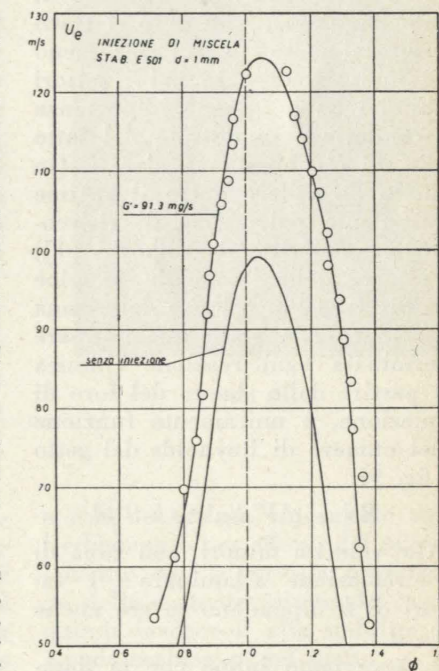


Fig. 3 - Esempio della parte superiore della curva di stabilità della fiamma, con e senza iniezione di miscela.

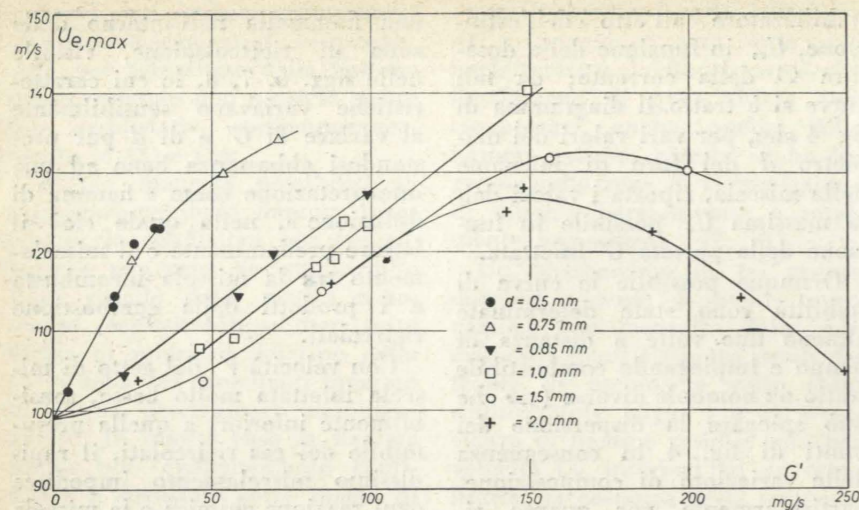


Fig. 4.

Per $d \geq 0,75$ mm (circa) ed alle maggiori velocità U , invece, dopo un tratto iniziale in cui la reazione chimica è limitata alla superficie di separazione tra getto di miscela e gas riciccolati appare una zona di combustione pressochè omogenea che, lateralmente, può giungere fino a confondersi con la fiamma pilota (figg. 7, 8).

Mancano purtroppo, allo stato attuale delle nostre conoscenze, informazioni teoriche e sperimentali capaci di interpretare quantitativamente il complesso fenomeno di mescolamento di getti con reazione chimica che determina l'esistenza e l'andamento di tale fiammella. Che però si tratti essenzialmente di un fenomeno di mescolamento in cui i fattori chimici hanno perciò importanza secondaria è dimostrato dal fatto che ad U abbastanza elevate (in modo da cadere entro il regime turbolento della zona di ricircolazione descritto da Zukoski [1]) l'altezza della fiammella, h , cioè la distanza lungo l'asse della zona di ricircolazione alla quale appare terminata ogni reazione chimica a partire dallo sbocco del foro di iniezione, è unicamente funzione del numero di Reynolds del getto (fig. 9):

$$Re' = \rho' V' d / \mu' \simeq k G' / d$$

Alle velocità minori, con zona di ricircolazione « laminare » i valori di h dipendono invece anche da d .

Osserviamo infine che la fiamma pilota non appare in nessun caso influenzata dalla presenza o

dal comportamento della fiammella ausiliaria nell'interno della zona di ricircolazione. Anche la lunghezza L di quest'ultima, rilevata con i consueti metodi, non risulta variare apprezzabilmente in presenza di iniezione di miscela; la sua determinazione si presenta però particolarmente difficile alle maggiori velocità per la presenza sull'asse della zona di ricircolazione dei prodotti della combustione della fiammella ausiliaria.

Ricordiamo che l'identica constatazione è stata fatta da Wong [17]. In tutte le esperienze effettuate l'estinzione è sempre stata totale, senza formazione di una fiamma residua stabile dopo l'estinzione di quella principale; nella maggior parte dei casi è però stato possibile rilevare l'esistenza di una fiamma residua, instabile, immediatamente dopo la estinzione di quella propagantesi in seno alla corrente.

4. L'aumento dei limiti di stabilità della fiamma in conseguenza dell'iniezione di miscela nella zona di ricircolazione non può essere spiegato facendo ricorso ad una delle correnti teorie sulla stabilizzazione mediante corpi non affusolati.

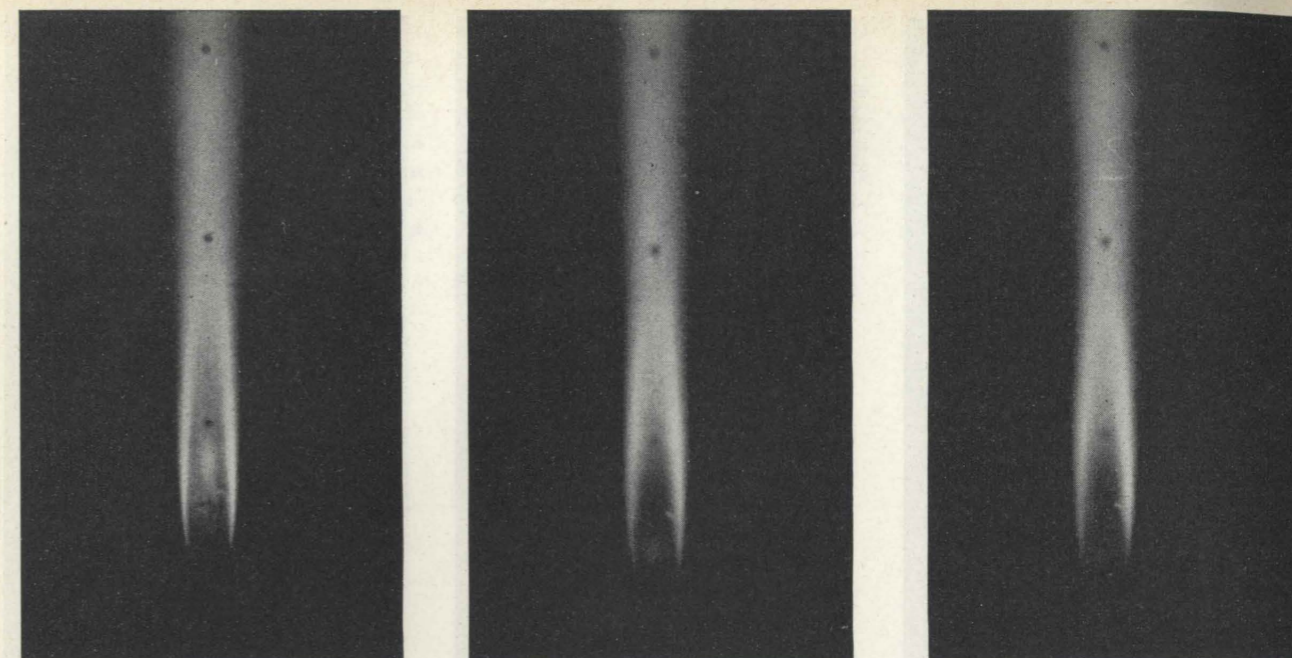
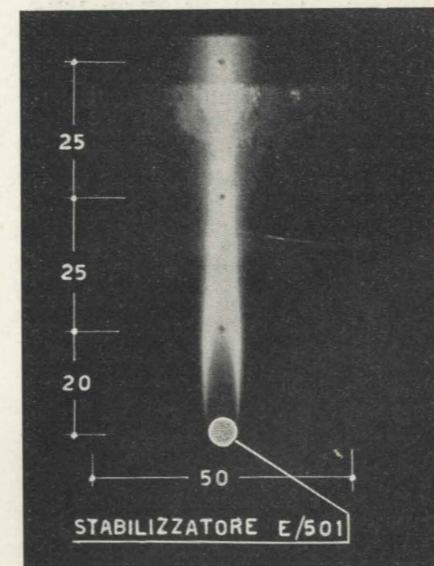
Infatti, se fosse vera l'ipotesi di Longwell, l'aumento nella quantità di miscela incombusta che penetra nella zona di ricircolazione, il cui volume apparentemente non varia, dovrebbe, a parità di condizioni comportare una diminuzione nella U_e per un dato

ϕ , tanto maggiore quanto maggiore è la portata iniettata G' .

Così pure, secondo l'ipotesi di Zukoski, l'aumento di U_e potrebbe essere imputato unicamente ad un aumento della lunghezza L della zona di ricircolazione per effetto dell'iniezione, aumento che non è stato riscontrato sperimentalmente, poichè ai confini della zona di ricircolazione si hanno comunque prodotti della combustione di composizione e temperatura corrispondenti alla dosatura della corrente principale, qualunque sia il valore di G' , e di conseguenza τ non varia.

Solo l'ipotesi di Cheng e Kovitz potrebbe dar ragione dell'andamento generale dei risultati sperimentali sopra riportati. Infatti un aumento locale della temperatura T_i (fig. 1) comporta una diminuzione della distanza x , a parità di ogni altra condizione, e quindi l'estinzione si avrebbe per velocità U_e più elevate. Tenuto conto però che la temperatura T_i è praticamente molto prossima a quella adiabatica di combustione [5] un suo aumento significativo potrebbe essere possibile solo quando la miscela iniettata reagisse nella immediata prossimità della regione di accensione della fiamma pilota; i limiti di stabilità dovrebbero quindi estendersi in proporzione inversa alla « penetrazione » del getto di miscela iniettata mentre tutte le osserva-

Fig. 5 - Fotografia della zona di ricircolazione e della parte iniziale della fiamma, senza iniezione. $U = 66,8$ m/s $\phi = 1,031$ (le quote sono in mm).



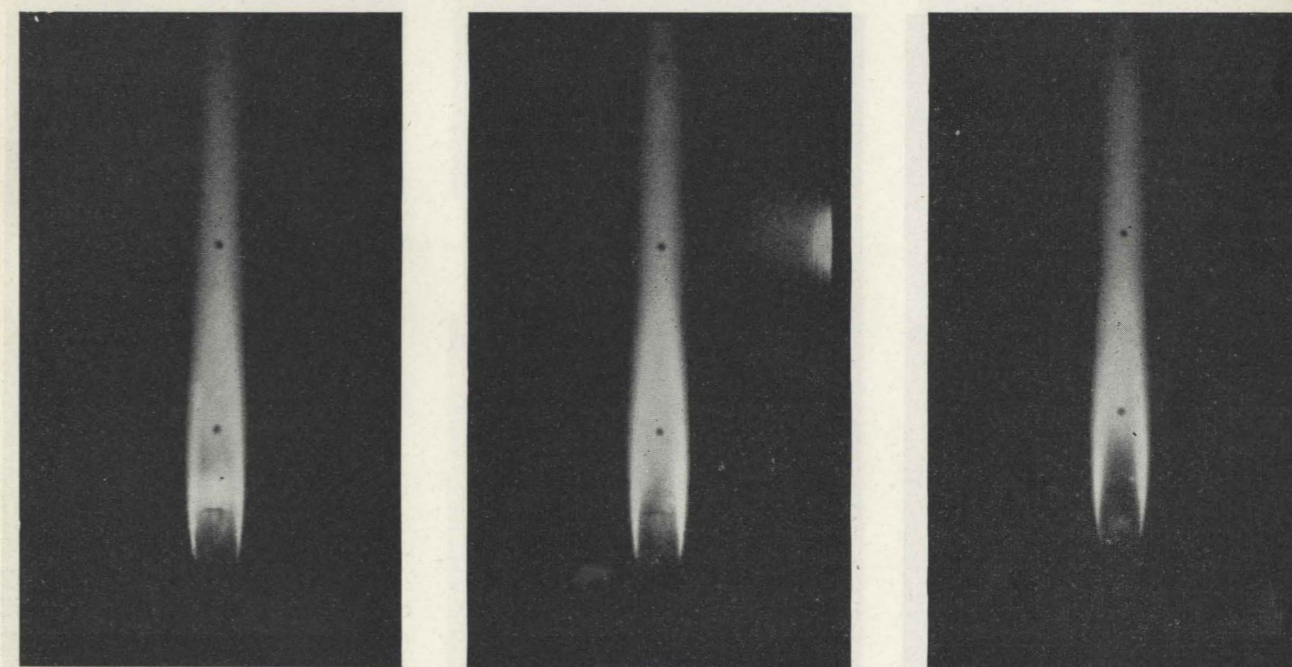
$G' = 21,5$ mg/s

$U = 65,5$ m/s

$G' = 9,2$ mg/s

$\phi = 1,076$

$G' = 2,0$ mg/s



$G' = 34,6$ mg/s

$U = 108,0$ m/s

$G' = 16,2$ mg/s

$\phi = 0,954$

$G' = 5,4$ mg/s

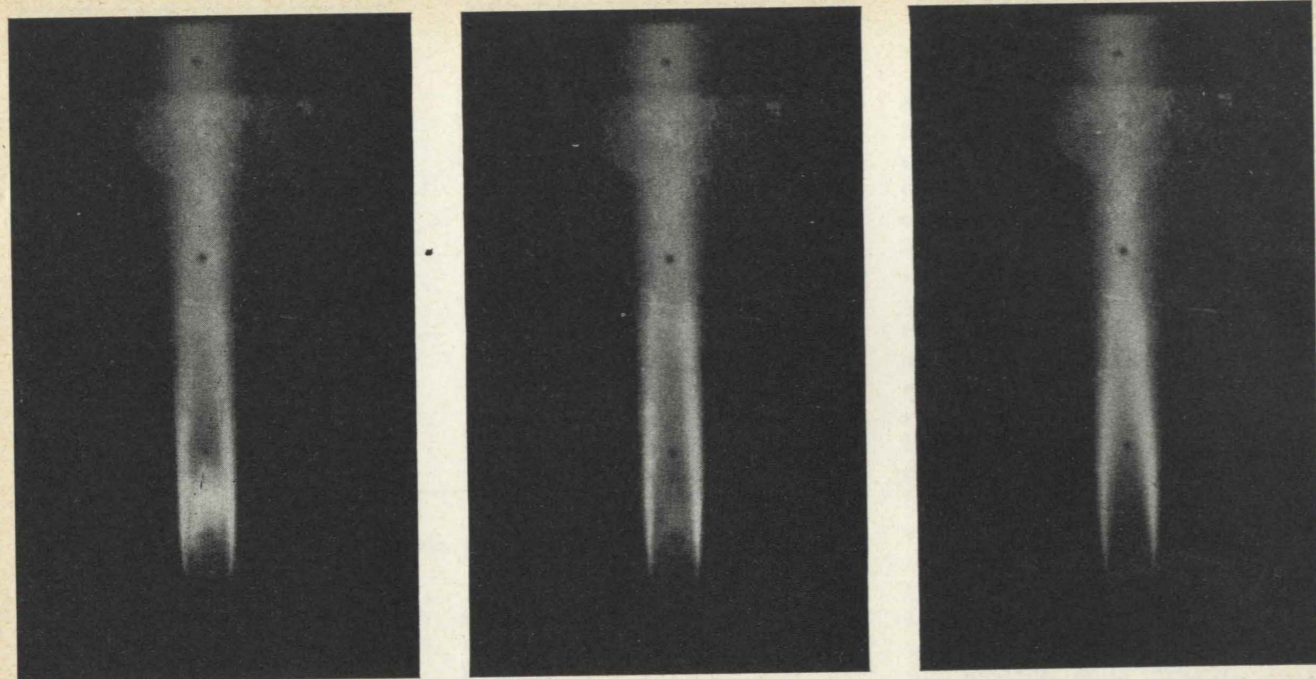
Fig. 6.

zioni sperimentali indicano esattamente il contrario.

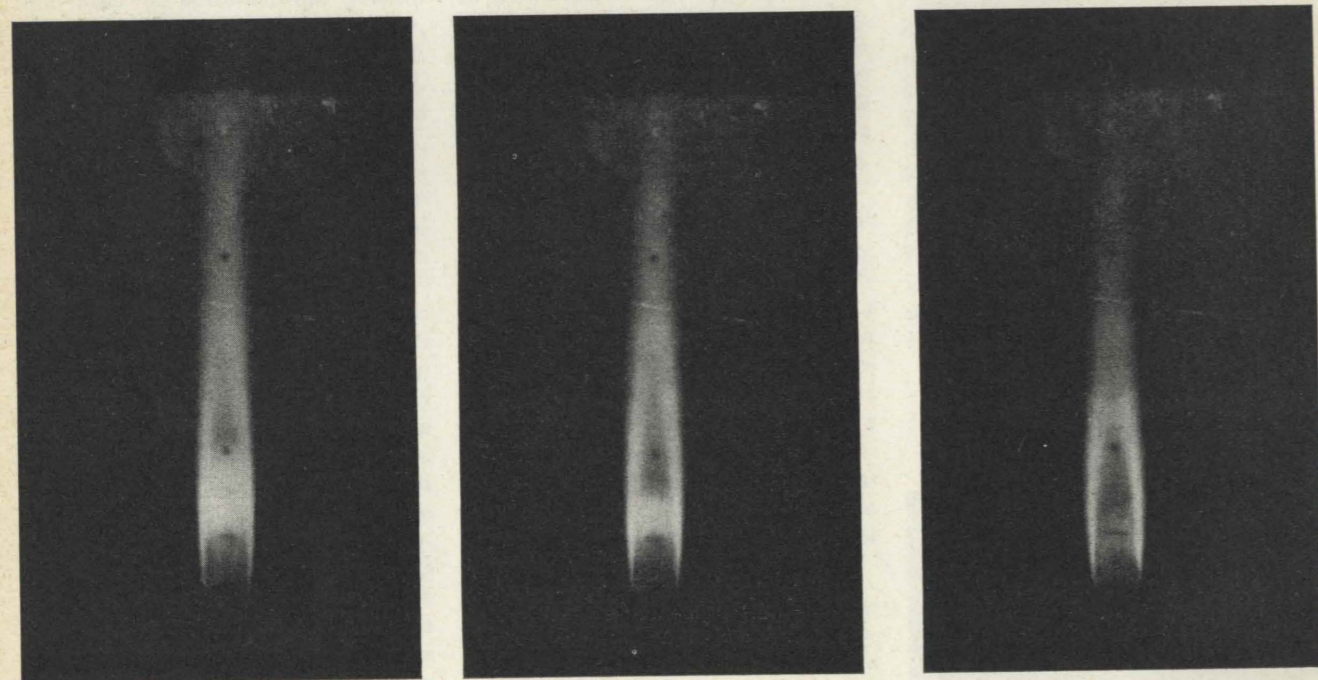
Se invece si ammette l'esistenza di un meccanismo di stabilizzazione in due stadi: accensione della fiamma pilota, propagazione della combustione alla fiamma principale, risulta evidente l'in-

terpretazione, sia pure qualitativa, dei diagrammi in fig. 4: l'aumento nei limiti di stabilità è strettamente legato alla quantità di prodotti di combustione della fiammella ausiliaria che possono giungere nella zona « critica » a valle della zona di ricircolazione

e che ne evitano un rapido raffreddamento per effetto del mescolamento con la miscela incombusta della corrente principale. Sono quindi favorevoli alla stabilità la « penetrazione » del getto e la possibilità di sua completa reazione prima di giungere al ter-



$G'=59.3\text{ mg/s}$ $U=66.8\text{ m/s}$ $G'=28.6\text{ mg/s}$ $G'=12.3\text{ mg/s}$
 $\varnothing=1.031$



$G'=105.5\text{ mg/s}$ $U=108.0\text{ m/s}$ $G'=57.3\text{ mg/s}$ $G'=38.8\text{ mg/s}$
 $\varnothing=0.965$

Fig. 7.

mine della zona di ricircolazione. Poichè le due esigenze sono antitetiche si chiarifica l'andamento apparentemente illogico delle curve sperimentali. Per piccoli valori di d , in conseguenza delle elevate V' , la penetrazione del getto è sensibile ma d'altra parte le por-

tate iniettate G' sono così ridotte da garantire la possibilità di completa reazione chimica prima del raggiungimento della zona critica. Ai valori di d più elevati con piccole G' la penetrazione del getto è insufficiente mentre con portate iniettate troppo elevate non tutta

la miscela può reagire completamente entro la zona di ricircolazione. Ciò del resto è abbastanza chiaramente visibile dall'esame delle figg. 6, 7, 8.

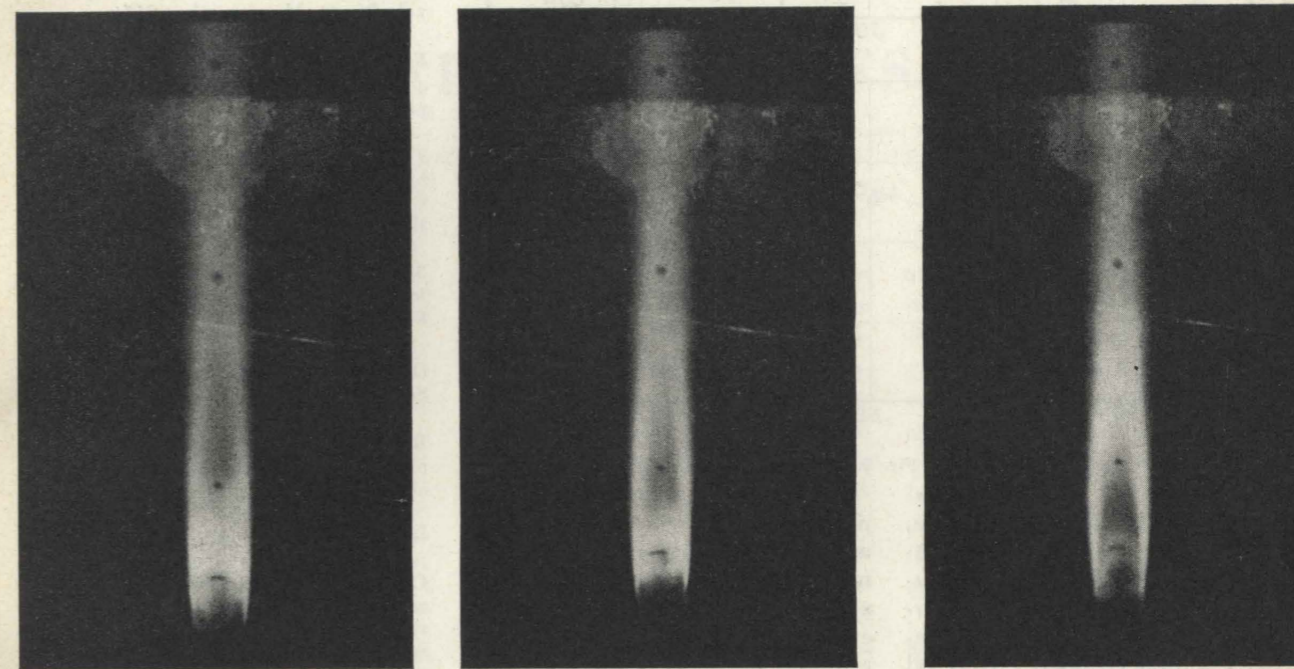
Il divario molto sensibile tra i risultati ottenuti iniettando la miscela attraverso un foro con $d=$

$=0,75\text{ mm}$ e quelli ottenuti per $d=0,85\text{ mm}$ può poi essere in parte attribuito ad effetti tridimensionali, nel senso che per $d \geq 0,85\text{ mm}$ il getto di miscela iniettata giunge a contatto con la fiamma pilota lungo parte della sua periferia e quindi non tutta la portata

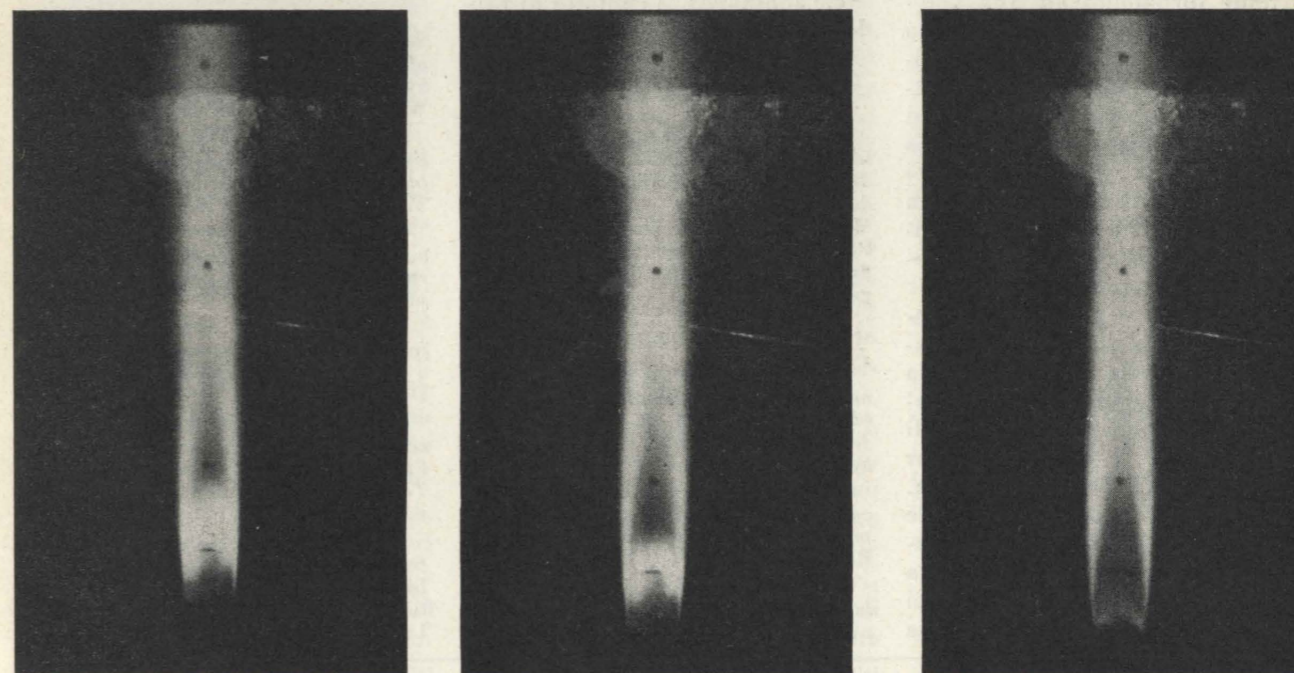
iniettata può reagire completamente non venendo a miscelarsi con una quantità sufficiente di prodotti della combustione.

In conclusione l'interpretazione qui proposta del meccanismo di stabilizzazione della fiamma e della sua estinzione appare concorda-

re pienamente con i risultati sperimentali sia di queste che delle altre ricerche conosciute mentre rende conto di tutti i fenomeni osservati in pratica. Rimane insoluto il problema di una formulazione quantitativa del criterio di stabilità più soddisfacente di



$G'=105.3\text{ mg/s}$ $U=67.5\text{ m/s}$ $G'=67.8\text{ mg/s}$ $G'=28.6\text{ mg/s}$
 $\varnothing=1.141$



$G'=193.5\text{ mg/s}$ $U=108.1\text{ m/s}$ $G'=113.0\text{ mg/s}$ $G'=60.9\text{ mg/s}$
 $\varnothing=0.945$

Fig. 8.

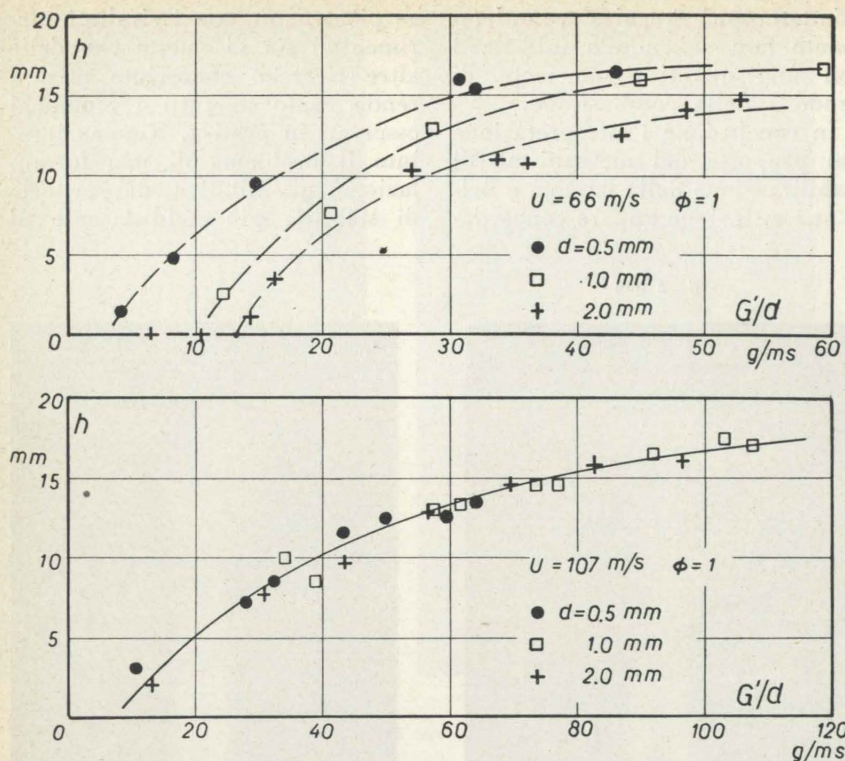


Fig. 9.

quella proposta di Zukoski che, come già detto, si adatta perfettamente all'ipotesi della stabilizzazione in due stadi pur di interpretare correttamente il significato del « tempo chimico » τ . A tal fine occorrerebbe disporre di dati teorici e sperimentali relativi alla propagazione di una fiamma in correnti turbolente ad alta velocità a partire da una zona pilota di reazione chimica (fiamma pilota), dati che purtroppo sono attualmente estremamente scarsi (quelli pubblicati e a conoscenza degli A. della presente nota si limitano alle ricerche di Jensen e Shipman [19] sulla accendibilità di miscele preformate mediante fiamme pilota coassiali).

Il problema è poi ulteriormente complicato dalla non ben chiara influenza della turbolenza sulla propagazione della fiamma, turbolenza che, nei casi pratici di stabilizzazione, è per la maggior parte generata dalla fiamma stessa.

Si ritiene ciononostante che le osservazioni qui riportate possano risultare utili sia ai fini della chiarificazione di alcuni fenomeni della combustione continua, sia

per indicare le vie da seguire per un miglioramento delle prestazioni degli stabilizzatori a corpo non affusolato, sia infine per porre in evidenza la necessità di ulteriori ricerche nel campo della « accensione spontanea per radicali » che, in questo particolare caso, appare molto più importante della accensione spontanea al contatto di prodotti della combustione.

Federico Filippi
e Laura Fabbrovich-Mazza

NOTA: Al rilevamento dei dati sperimentali ha contribuito l'Ing. Piero Codogone, vincitore di una Borsa di Studio della Shell Italiana presso l'Istituto di Macchine e Motori per Aeromobili del Politecnico di Torino. La ricerca è stata finanziata dal C.N.R. Comitato per l'ingegneria.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ZUKOSKI, E. E., *Review of information concerning flame stabilization on bluff bodies*, Calif. Inst. of Technol., Jet Propulsion Lab. Rep., n. 20-220, aprile 1954.
- [2] PENNER, S. S., WILLIAMS, F., *Recent studies on flame stabilization of premixed turbulent gases*, Appl. Mech. Reviews., vol. 10, n. 6, giugno 1957.
- [3] FILIPPI, F., *La stabilizzazione della fiamma negli esoreattori*, L'Aerotecnica, vol. XXXVIII, n. 1, 1958.

[4] LONGWELL, J. P., *Flame stabilization and flame propagation in ramjet combustors*, Combustion Researches and Reviews, Butterworths, London, 1955.

[5] ZUKOSKI, E. E., MARBLE, F. E., *Experiments concerning the mechanism of flame blowoff from bluff bodies*, Proc. Gas Dynamics Symp. on Aerothermochemistry, Northwestern University, Evanston, 1956.

[6] WRIGHT, F. H., BECKER, J. L., *Combustion in the mixing zone between two parallel streams*, Jet Propulsion, vol. 26, n. 11, novembre 1956.

[7] PENNER, S. S., MULLINS, B. P., *Explosions, detonations, flammability and ignition*, AGARDograph n. 31, Pergamon Press, London, 1959.

[8] CHENG, S. I., KOVITZ, A. A., *Theory of flame stabilization by a bluff body*, Seventh Symp. (International) on Combustion, Butterworths, London, 1959.

[9] CHENG, S. I., KOVITZ, A. A., *Mixing and chemical reaction in the laminar wake of a flat plate*, Journ. Fluid Mechanics, maggio 1958.

[10] KOVITZ, A. A., HUI-MING FU, *On bluff body flame stabilization*, Appl. Scientific Res. (in stampa).

[11] FETTING, F., CHOUDHURY, A. P. R., WILHELM, R. H., *Turbulent flame blowoff stability. Effect of auxiliary gas addition into separation zone*, Seventh Symp. (International) on Combustion, Butterworths, London, 1959.

[12] FILIPPI, F., FABBROVICH-MAZZA, L., CALANDRINO, S., *Ricerche sulla stabilizzazione delle fiamme in correnti ad alta velocità, II serie: Iniezione di gas nella zona di ricircolazione*, L'Aerotecnica, vol. XL, n. 1, 1960.

[13] FILIPPI, F., FABBROVICH-MAZZA, L., *Control of bluff-body flameholders stability limits*, Eighth Symp. (International) on Combustion, 1960 (in stampa).

[14] SHIPMAN, C. W., WILLIAMS, C. C., *Some properties of rod-stabilized flames of homogeneous gas mixtures*, Fourth Symp. (International) on Combustion, Williams & Wilkins, Baltimore, 1953.

[15] POTTER, A. E., WONG, E. L., *Effect of pressure and duct geometry on bluff-body flame stabilization*, NACA TN 4381, settembre 1958.

[16] FILIPPI, F., *Ricerche sulle turbine a gas: influenza della camera di combustione sulla stabilità della fiamma*, ATA, novembre 1958.

[17] WONG, E. L., *Flame stability effect of gases ejected into a stream from a bluff-body flameholders*, NASA TN D-128, agosto 1959.

[18] FILIPPI, F., *L'impianto per le ricerche sulla combustione continua dell'Istituto di Macchine del Politecnico di Torino*, L'Aerotecnica, vol. XXXVIII, n. 2, 1958.

[19] JENSEN, W. P., SHIPMAN, C. W., *Stabilization of flame in high speed flow by pilot flames*, Seventh Symp. (International) on Combustion, Butterworths, London, 1959.

Direttore responsabile: **AUGUSTO CAVALLARI-MURAT**

Autorizzazione Tribunale di Torino, n. 41 del 19 Giugno 1948

STAMPERIA ARTISTICA NAZIONALE - TORINO